

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

Área de Ingeniería Térmica



PROYECTO FINAL DE CARRERA

INSTRUMENTACIÓN, ADQUISICIÓN DE DATOS Y ENSAYO DE BICI-BOMBAS DE MECATE

Autor: SERGIO RUIZ MARTÍN

Director: ULPIANO RUIZ-RIVAS HERNANDO

Ingeniería Técnica Industrial especialidad Electricidad

Madrid 30 de Junio de 2011

Agradecimientos:

Gracias a Ulpiano por haberme ofrecido la oportunidad de realizar este proyecto.

Gracias a mis hermanas, Olga y Cristina, y a mi abuela Marina, porque sin su ayuda todo habría sido más difícil.

Gracias a ti, María José por quererme incondicionalmente, ser paciente y comprensiva aún cuando no lo merecía.

Gracias a todos los que de alguna manera han colaborado al darme sus conocimientos y sus experiencias personales con las que poder afrontar mejor la vida.

Y sobre todo gracias a mis padres por darme a entender su forma de vida y darme la mía.

Gracias porque sin vosotros simplemente no existiría.

ÍNDICE

1.- Introducción.	9
2.- Bombas manuales de agua.	11
2.1.- Necesidades de agua potable.	12
2.2.- Concepto VLOM.	13
2.3.- La Bomba de Mecate.	14
2.3.1.- Variantes de la Bomba de Mecate.	18
2.4.- Potencia humana aplicada al manejo de bombas manuales de agua.	24
3.- Instalación.	26
3.1.- Instalación inicial.	26
3.1.1.- Polea tractora o motriz.	37
3.1.2.- Estructura soporte.	31
3.1.3.- Cuerda con pistones.	34
3.1.4.- Tubería de impulso y de retorno.	35
3.2.- Acciones de mejora.	39
3.2.1.- Acciones inmediatas.	39
3.2.2.1.- Normalización de tornillería.	39
3.2.2.2.- Sustitución de los cojinetes.	40
3.2.2.3.- Fortalecimiento de la estructura soporte.	40
3.2.2.- Segundas Acciones.	42
3.2.2.1.- Sustitución del surtidor.	42
3.2.2.2.- Fabricación nuevos pistones.	45
3.2.2.3.- Aumento de capacidad del sistema de desagüe.	45
3.3.- La bici-bomba de mecate.	56
3.3.1.- Introducción.	56
3.3.2.- Restauración de la bicicleta.	58
3.3.3.- Soporte de la bicicleta.	59

3.3.4.- Adaptación de la rueda de ciclomotor a la bici-bomba de mecate.	60
3.3.5.- La bici-bomba de mecate.	62
3.3.6.- Construcción de un freno dinamométrico.	63
3.3.7.- Presupuesto.	65
4.- Resultados.	67
4.1.- Introducción.	67
4.1.1.- Comportamiento en la tubería.	67
4.1.2.- Comportamiento en el surtidor.	70
4.2.- Frecuencia natural de bombeo.	71
4.3.- Altura del frente de agua y nivel de agua útil.	73
4.4.- Estudio de las fuerzas aplicadas.	73
4.4.1.- Masa de agua.	77
4.4.2.- Fuerza resultante.	78
4.5.- Par sobre la rueda.	78
4.6.- Potencia.	78
4.7.- Potencia frente a Altura.	79
4.7.1.- Fuerza de rozamiento lineal.	80
4.8.- Fuerza aplicada en columnas parcialmente ocupadas.	81
4.9.- Potencia frente a la Altura a distintos intervalos de ocupación.	83
4.10.- Relaciones de Par y Potencia en los dos ejes.	84
4.11.- Esfuerzo desarrollable por los usuarios.	87
4.12.- Comparaciones entre modelo y experimentos.	88
4.13.- Medidas con el dinamómetro.	89
4.13.1.- Frecuencia natural a diferentes alturas.	89
4.13.2.- Caudal frente a Potencia.	89
4.13.3.- Caudal frente a Altura.	91

5.- Conclusiones.	93
6.- Nomenclatura.	94
7.- Bibliografía.	97
8.- Organizaciones Internacionales relacionadas.	98
9.- Anexos.	99

1.- INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enmarca dentro de las labores del Grupo de Tecnologías Apropriadas de la Universidad Carlos III de Madrid. Debido a la importancia que tiene el abastecimiento de agua potable a nivel mundial, este estudio trata de obtener resultados mediante una herramienta concreta para su obtención, que es la Bomba de Mecate. Este sistema manual de bombeo, ha tenido una gran aceptación en países subdesarrollados en los últimos 20 años, debido a su bajo coste económico y facilidad de mantenimiento. Además la Bomba de Mecate se puede usar en cualquier comunidad rural (concepto VLOM) porque las piezas que la componen son fáciles de adquirir en cualquier sitio. Esta ventaja coloca a la bomba a la cabeza de sus otras competidoras como pueden ser la bomba Afridev, Indian Mark III o la Vergnet, que requieren piezas más personalizadas.

La ubicación de la instalación se encuentra en el Laboratorio de Tecnologías Apropriadas que la universidad tiene en la Avenida del Mediterráneo en Leganés, Madrid. Sobre una plataforma lindante al edificio, se encuentra una estructura de tres plantas, donde se ha desarrollado un banco de ensayos con tres tipos distintos de bombas manuales de agua. Una de ellas es la Bomba de Mecate en configuración manual accionada por medio de una manivela. Estas bombas forman parte de proyectos ya realizados, otros existentes en la actualidad y otros que darán paso a estudios futuros aún por concretar.

Bajo una primera instalación previa de este dispositivo, realizada en un proyecto anterior por Javier Torbella Arredondo, se van a introducir en un primer lugar las mejoras necesarias para su correcto funcionamiento. Al comienzo eran muchos los defectos que se detectaron y que hacían que apenas pudiera tener un funcionamiento básico, puesto que ni siquiera podía el sistema de retorno de agua absorber la capacidad de caudal que la bomba generaba. Tras estas mejoras, se pretende modificar el rendimiento de la instalación, con la ayuda de la adaptación de una bicicleta que nos ofrecerá una mayor potencia, una mejora de esfuerzo temporal y mayor comodidad para realizar el trabajo de extracción de agua del depósito. Se estudiarán los parámetros que caracterizan esta nueva configuración y se comparará con la antigua bomba.

Se ha contado con abundante bibliografía, si bien es cierto que en algunas partes concretas se ha dado rienda suelta al ensayo-error hasta obtener los resultados deseados. Aunque existen varios manuales básicos de construcción y funcionamiento, son pocos los datos donde se incluyan estudios más serios de comportamiento en diferentes estados de funcionamiento. Siempre se ha procurado realizar los cálculos paso a paso para que cualquier persona sin previos conocimientos pueda llegar a comprenderlos.

La estructura de este proyecto está dividida en los siguientes apartados:

- Tras la presente introducción, en el capítulo dos, se describen las necesidades de agua potable en el planeta. Tras una breve descripción de los distintos tipos de bombas manuales más usadas, y la compresión del concepto VLOM, se pasa a detallar el funcionamiento de la Bomba de Mecate como solución a la necesidad de agua potable. En este apartado se enumeran los distintos tipos de variantes de esta bomba que se pueden encontrar a lo largo de la extensa geografía mundial. Para terminar se añade una pincelada de datos de potencia que el ser humano es capaz de desarrollar, ya sea con los brazos como con las piernas.
- En el tercer capítulo, se detalla en un primer lugar la instalación existente en el laboratorio, se detectan todos los problemas y carencias que posee y se mejoran sustancialmente mediante unas acciones inmediatas y otras que requieren un estudio más intenso. Como cambio trascendental, que marcará el hilo de este proyecto, se introduce la bicicleta. Esta adaptación se ha realizado desde cero, recuperando piezas que irían directamente a la chatarra, y justificando de este modo aún más en concepto VLOM. Para ello se ha puesto especial hincapié en modificar lo menos posible la estructura inicial, amén de facilitar en el futuro el accionamiento libre de cualquiera de las dos maneras, por medio de la manivela o con ayuda de la bicicleta. Posteriormente se procede a su caracterización. También se ha construido un sistema de frenado que por medio de un dinamómetro, controla la fuerza de rozamiento que se asemejaría a distintos niveles de profundidad de agua, para su posterior estudio.
- En el cuarto capítulo, se recogen los múltiples resultados obtenidos, a veces por medio de gráficas o tablas donde se analiza el comportamiento de la instalación, en distintas configuraciones de funcionamiento. Estas pueden ser en algún caso la frecuencia de giro, el caudal extraído, la altura de bombeo... Para medir estos parámetros se han utilizado aparatos de medida de diferentes niveles de precisión, si bien aún no se ha monitorizado los datos, dejando esta parte libre para futuros proyectos.
- En el quinto capítulo, se han obtenido las conclusiones pertinentes de la elaboración de este proyecto.
- Y finalmente se concluye con un resumen de la nomenclatura utilizada, puesto que es bastante amplia y debe quedar lo mejor reflejada posible. Se ha incluido la bibliografía que se ha utilizado y las diversas direcciones web de las organizaciones sin ánimo de lucro que podemos encontrar en internet. Los anexos cierran el proyecto, tales como planos de la instalación que se han dibujado sobre el programa SketchUP, software libre, puede ser utilizado por cualquier persona en cualquier rincón del mundo.

2.- BOMBAS MANUALES DE AGUA

En este tema se pretende expresar una idea general de los distintos tipos de bombas manuales que existen en la actualidad. Con esta ligera idea, podremos situar donde se encuentra exactamente ubicada la bomba de mecate, que es el interés de este proyecto.

Por esta razón, solo se mencionaran los distintos tipos de bombas sin entrar en mayor detalles, siendo mucha la bibliografía especializada, donde el lector en su interés, puede profundizar en estos campos.

A modo de resumen:

- Bombas de pistón. También conocidas como bombas de embolo o aspirantes, emplean un sistema de pistón como mecanismo de funcionamiento. Dentro tenemos; *bombas de succión*: ayudados por una palanca, accionamos el pistón que al elevarse provoca un vacío entre válvulas que genera una diferencia de presión respecto al pozo, elevando así el agua (hasta 7 metros); *bombas de acción directa*: donde la acción del pistón y de la columna de agua se realizan directamente con la fuerza del usuario, aumentando su sencillez (hasta 20 metros); y las *bombas de pozo profundo*: que combina el esfuerzo de dos personas para conseguir elevar agua de profundidades de hasta 60 metros con tubería de 50mm.
- Bombas de diafragma. Esta bomba está fundamentada en el movimiento de una membrana elástica o diafragma que al elevarse absorbe agua a través de una válvula. Cuando se comprime por medio de la manivela, este agua se expulsa por la siguiente válvula. Dentro podemos clasificar dos tipos: *bomba Vernet*: que se acciona mediante un pedal (aumentando la potencia) y un pistón que corre por un cilindro piloto; y la *bomba Avi-ASM*: se trata de una combinación entre la anterior bomba y los mecanismo de accionamiento de pistón utilizándose también un pedal.
- Bombas de cubo y cuerda. Es el sistema más antiguo de la humanidad, con la ayuda de una cuerda y un recipiente vacío, se baja hasta alcanzar el nivel de agua del pozo y posteriormente se eleva. Se pueden emplear ruedas o poleas para facilitar la operación. Aún siendo un mecanismo tan poco eficiente, debido a su sencillez se sigue empleando en la actualidad en muchos rincones del mundo.
- La bomba de mecate. Es el objeto del proyecto y por ello se especificará detalladamente más adelante.

2.1.- Necesidades de agua potable

Hoy, al menos 1/5 de todas las personas a nivel mundial, carecen de acceso a agua potable segura. Las infecciones del hombre relacionadas con el agua son extremadamente numerosas y diversas. Enfermedades como el Cólera, Tifoidea y Hepatitis, tracoma e infección en la piel, Fiebre amarilla, malaria etc... son las encargadas de casi 2 millones de muertes de niños en el mundo cada año.

El agua conforma el 60 por ciento del peso corporal, incluso los huesos contienen un 20 por ciento de agua. Entre las necesidades del agua destacan; Transportar nutrientes y oxígeno a todas partes del cuerpo vía la sangre, Ayudar a mantener la temperatura corporal, Desechar materiales de funciones fisiológicas..

Al introducir una bomba manual en regiones donde por ejemplo se encuentra un sistema de almacenamiento y distribución de aguas, mejoramos sustancialmente la calidad de vida de esa región. La Organización Mundial de la Salud (OMS) informa de que hay entre 2.400 y 3.000 millones de personas que carecen de acceso a servicios sanitarios.

Según los estudios realizados por la OMS, son necesarios al menos 50 litros por persona y día como consumo aceptable, para garantizar las condiciones suficientes de salud. Estos 50 litros, serán la cantidad necesaria para el consumo de agua de beber, agua para la elaboración de alimentos y para la higiene personal. Sin embargo el Plan de Naciones Unidas (PNUD) reduce esta cifra a tan solo 20 litros por persona y día como consumo básico.

El agua limpia, accesible y asequible es un derecho humano y un fundamento para el desarrollo económico y social.



Figura 2.1. Mujer sacando agua con bomba de mecate. Madagascar 2003.

2.2.- El concepto VLOM

El concepto de VLOM (Village Level Operation and Maintenance) nace debido a la falta de recursos, económicos y energéticos, para obtener agua con la que poder satisfacer unas necesidades básicas. Este concepto consiste en garantizar el fácil acceso a una bomba de mano a cualquier tipo de persona, tanto por su montaje (piezas y mantenimiento), como por su bajo coste económico. Estas bombas han de ser resistentes al uso, seguras y capaces de elevar el agua para alturas superiores a 25 metros.

De este modo, se pretende simplificar al máximo la tecnología para el abastecimiento de agua haciendo posible que todo campesino de un poblado determinado, pueda participar en el proceso de montaje, puesta en marcha y posterior mantenimiento de la bomba. De esta manera, bajo cualquier fallo, pueda repararla de forma sencilla y con pocas herramientas, evitando así la dependencia de un soporte exterior, que en ocasiones podría dejar fuera de servicio al equipo durante un largo periodo de tiempo. Por poner un ejemplo, un estudio realizado en Etiopía, reveló que el 29% de las bombas de mano y el 33% de las perforaciones mecanizadas no funcionaban por problemas de mantenimiento (Informe sobre Desarrollo Humano 2006, PNUD).

Es así como conseguimos descentralizar un equipo y aumentamos su flexibilidad de operación en cualquier parte del mundo. Son los propios pobladores los que además se han de encargar de actuar como administradores del servicio que la bomba proporciona para su comunidad. Estos individuos han de encargarse de las necesidades de mantenimiento, de tener ciertas provisiones de repuestos de costes accesibles y de garantizar su correcto funcionamiento con una preparación previa básica.

Para que sea posible introducir esos equipos a nivel de poblado, es imprescindible crear un mercado local de piezas “apropiadas” para las bombas con la suficiente tecnología. Los gobiernos de estos países y del resto de países donantes, deben entender las necesidades de agua de estos grupos, ayudando a empresas locales a crear unos estándares de normalización y control de calidad. Así se logra establecer un equilibrio entre las responsabilidades de las autoridades públicas y de las diferentes comunidades de los poblados.

El tiempo empleado en obtener agua incluyendo los desplazamientos al pozo es un factor clave. Es en estas zonas donde el papel de la mujer toma un valor importante, pues es quien emplea más tiempo en su obtención. Un fácil acceso al agua segura, reduce la demanda de tiempo de las mujeres y crea oportunidades de generación de ingresos.

2.3.- La Bomba de Mecate

La bomba de mecate es una adaptación de un sistema milenario de bomba de cadena con pistones originaria de China. Durante los años setenta y ochenta se fomentó la introducción de la bomba de mecate en muchos países, a través de proyectos para el desarrollo. Es en Nicaragua donde se hacen los primeros pasos para mejorar esta bomba de tecnología “apropiada”. Puesto que mecate significa cuerda en castellano nicaragüense, también podemos encontrarla referida como *bomba de sogá* (en Cuba), *bomba de cuerda* en español o *Rope Pump Water* en inglés.

Su principio de funcionamiento consiste en hacer pasar un bucle continuo de cuerda con pistones de plástico atados a una cierta distancia entre sí, por una tubería vertical sumergida en su parte inferior en agua. El agua ocupa el espacio entre los pistones y es elevada por el movimiento continuo de la cuerda mediante una rueda de accionamiento manual.

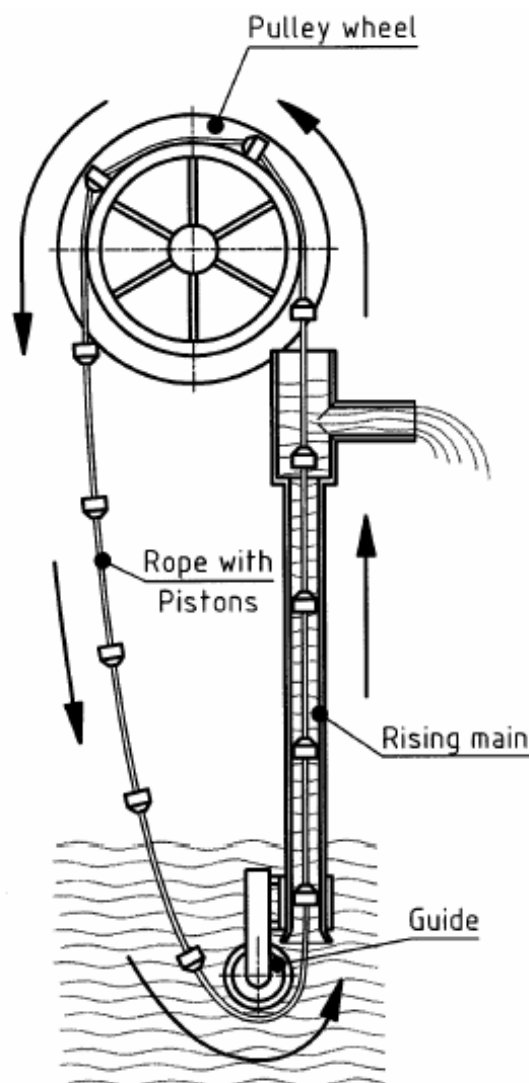


Figura 2.2. Esquema de funcionamiento de la bomba de mecate. (SKAT, 2005).

El diámetro interior del tubo de PVC es el que marca las pautas de la construcción de los pistones pues ha de existir la suficiente holgura para facilitar el deslizamiento. El diámetro del pistón es importante. A mayor holgura, mayor facilidad de movimiento a través del tubo pero menor eficiencia. El equilibrio se encuentra en torno a los 0,5-1mm de diámetro de diferencia.

Para su correcto funcionamiento debe engrasarse periódicamente el eje de la rueda. Si ha tenido un uso diario, al año debe reemplazarse la cuerda. Los pistones tienen una vida útil de un par de años según su fabricación. Si está expuesta al aire libre, conviene dar una mano de pintura cuando se aprecien síntomas de oxidación. Para evitar el desgaste producido en la cuerda y los pistones por la acción del sol, se emplean tapas o cubiertas que cubren la rueda por encima.

La bomba de mecate tiene una amplia aplicación, es usada en pozos familiares y comunales, para fines de agua y saneamiento y para fines agrícolas, en pozos excavados a mano y en pozos perforados, y puede ser usada en pozos hasta de sesenta metros de profundidad. Su alta eficiencia, bajo costo y fácil mantenimiento pueden ser considerados como la razón principal de la aceptación social. Además no requiere hacer mucho esfuerzo para sacar agua del pozo (50N-100N).

El Instituto Nacional de Agua y Saneamiento de Nicaragua, considera esta como la bomba más apropiada para el área rural donde no hay acceso a energías convencionales y aplica la bomba para aumentar la cobertura de suministro de agua. Varias organizaciones internacionales activas en Nicaragua tal como UNICEF, OMS, CARE, Cruz Roja, Médicos sin Fronteras, Plan Internacional comparten esta opinión.

Un estudio realizado por el Banco Mundial en 1995 concluyó que el costo anual de mantenimiento de la bomba de mecate nunca superaba los \$10. En comparación, el costo de mantenimiento anual de las bombas en la India de accionamiento por pistón, están en el rango de \$59 a \$107. Igualmente el costo de instalación de la bomba de mecate también es significativamente menor. El precio de adquisición de la bomba de mecate medio ronda los \$150 variando en función de la profundidad y el país de adquisición.

Como han sido muchos los países que han adoptado el concepto de diseño de la bomba de mecate, en cada país o región se han hecho adaptaciones concretas, según su utilización. Uno de estos países es Madagascar, quien en colaboración con la SKAT, ha formalizado unas especificaciones técnicas detalladas de esta tecnología apropiada.

A continuación se a pasar a detallar los dos modelos de bombas de mecate más significativos existentes en la actualidad, que son la bomba de Nicaragua y la bomba de Madagascar.

- Bomba de Nicaragua.

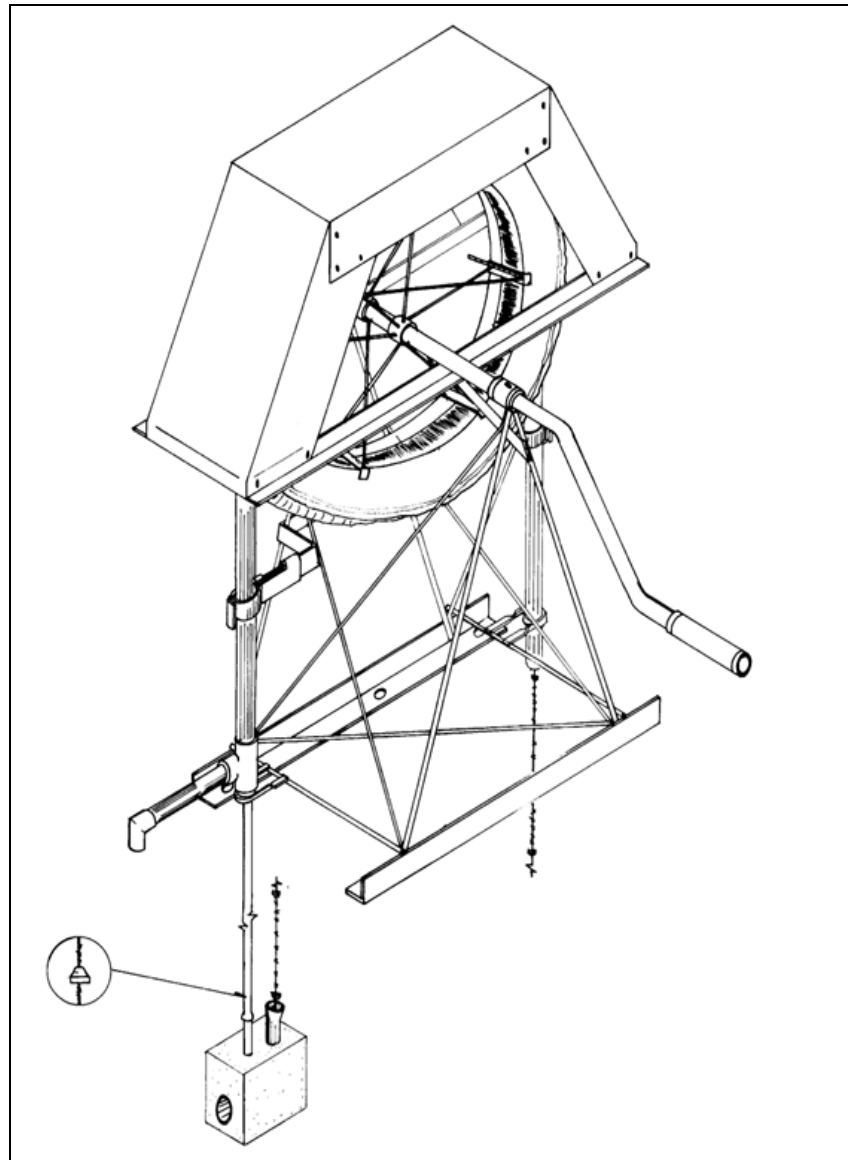


Figura 2.3. Bomba de Mecate de Nicaragua. (Extra-Strong Rope Pump, 2007)

Su capacidad de bombeo puede estar por encima de los 40 metros. La estructura superior consiste en piezas metálicas ensambladas y soldadas que le otorgan la consistencia necesaria para mantener un correcto funcionamiento a elevadas profundidades. El cojinete sobre el que gira el eje de la manivela solidaria la rueda metálica. No posee rodamientos por lo que el contacto se realiza directamente metal contra metal. El elemento más inferior, la caja guía, está construida con tubería de PVC forrada de cemento y con una pieza de arcilla que hace de guía.

- Bomba de Madagascar.

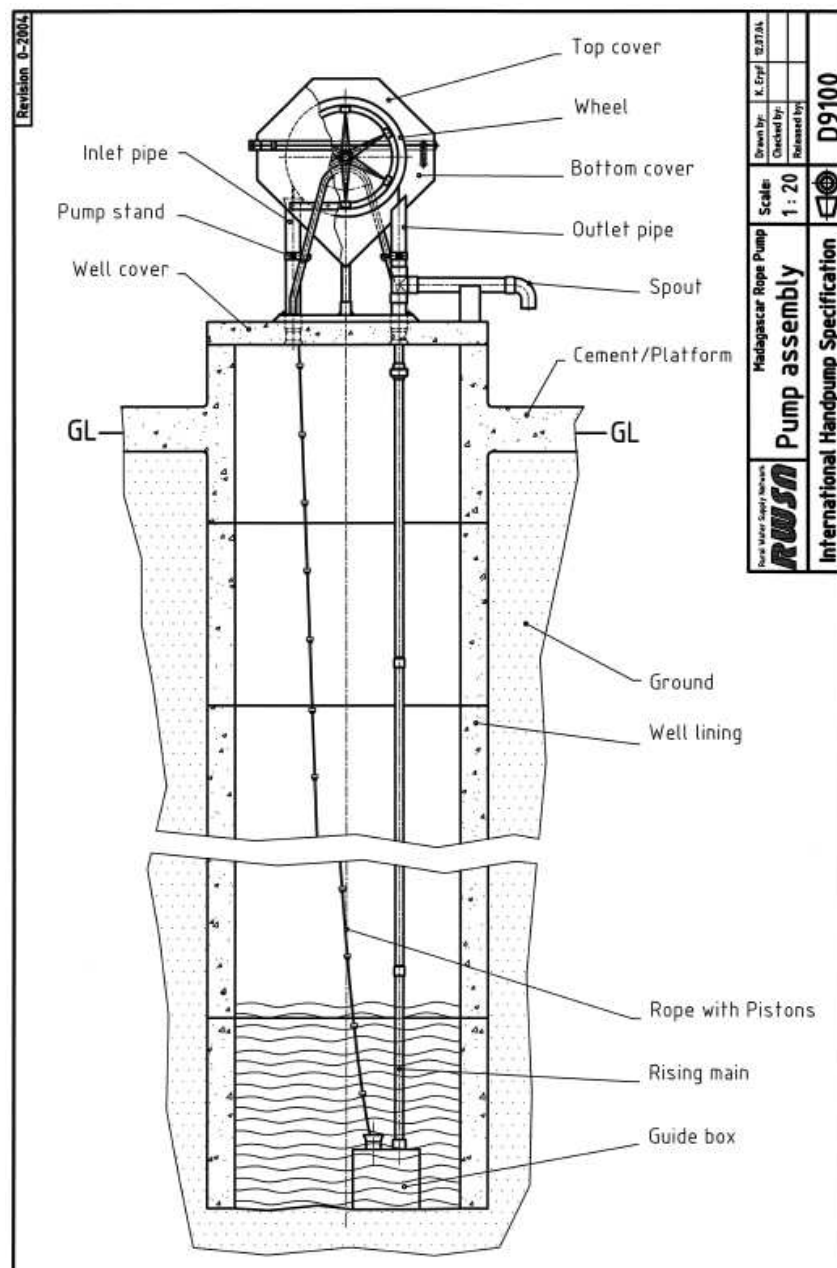


Figura 2.4. Bomba de Mecate de Madagascar. (SKAT, 2004).

Esta bomba a diferencia de la de Nicaragua tiene menor capacidad de bombeo, unos 30 metros. Su estructura es más sencilla que la anterior, y menos robusta. El eje de la manivela va en este caso apoyado sobre unos cojinetes redondos de madera. Este material le confiere un deslizamiento más suave, pero reduce mucho su durabilidad, si bien es cierto que la sustitución de esta pieza puede ser sencilla. La caja guía en lugar de llevar una pieza cerámica, tiene una botella de vidrio que permite deslizar fácilmente la cuerda con los pistones. Es habitual encontrar en la cubierta superior una plataforma de cemento que permite recoger el agua que salpica de la cuerda o se pierde del caño, y se canaliza para un aprovechamiento inmediato.

2.3.1.- Variantes de la Bomba de Mecate.

2.3.1.1.- Modelo sobreelevado.

Este modelo es ideal para el tipo de instalaciones donde se pretende almacenar cierta cantidad de agua en un depósito elevado. El claro ejemplo es el pequeño centro médico donde existe un depósito de agua en el tejado para cubrir las necesidades diarias de los enfermos. También se la conoce como bomba de sogá de torre (Cuba).

Básicamente consiste en añadir al sistema inicial otra pequeña polea en el extremo superior donde queramos elevar el agua. Pero la operación manual de accionamiento se sigue haciendo desde el suelo. Para ello basta con cruzar la cuerda (como vemos representado en la siguiente figura) para conseguir la tracción necesaria para realizar este sobre esfuerzo.

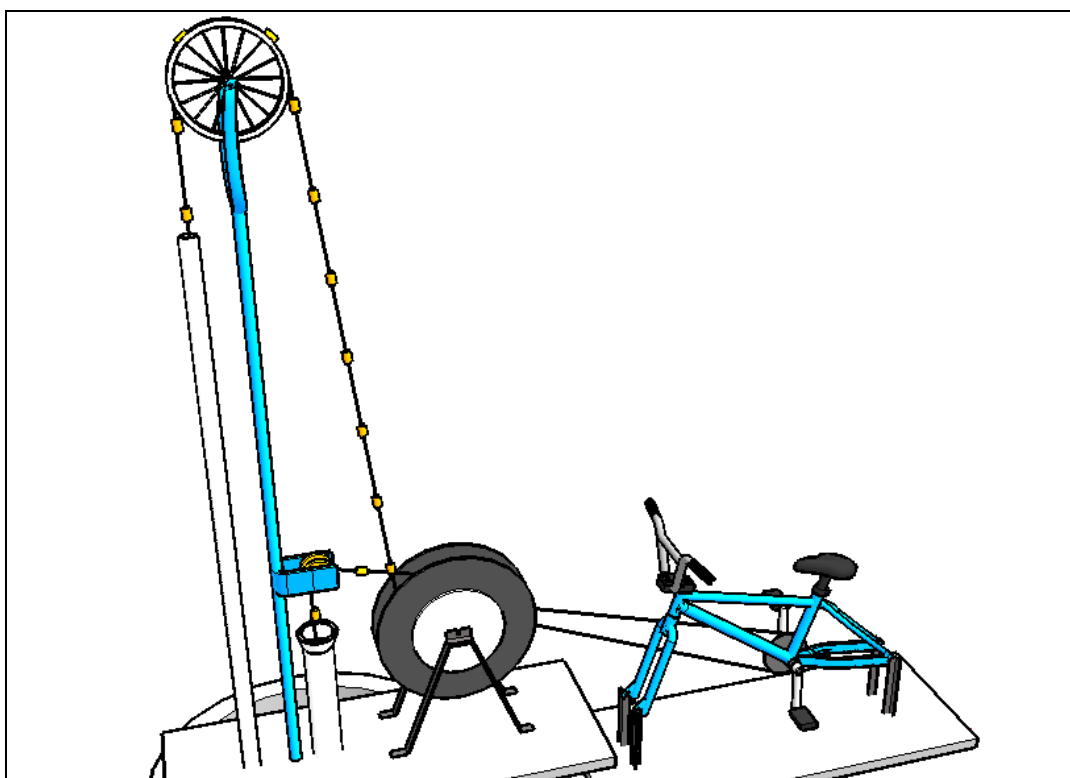


Figura 2.5. Esquema de la Bomba de Mecate sobreelevada. (www.mayapedal.org)

La altura total es la suma de la profundidad del pozo, más la altura desde la superficie hasta el punto más elevado de descarga. Como necesitamos ejercer mayor fuerza para elevar el agua, se pueden utilizar dos manivelas unidas para accionarse por dos personas o se puede emplear una bicicleta.

2.3.1.2.- Modelo de accionamiento animal.

Es una adaptación de la bomba de mecate, por medio de una transmisión angular. Si el accionamiento se hace con la ayuda de un caballo o un burro, también conocida como Bometran, la capacidad de bombeo es 4 veces superior a la de la bomba manual. Así podemos aumentar la profundidad media del pozo y llegar a zonas donde manualmente es muy laborioso.

Para instalar este modelo, se requiere que el perímetro a la bomba esté libre de obstáculos. El mantenimiento que se requiere consiste en limpiar semanalmente los dientes de los engranajes procurando que estén recubiertos de aceite. Hay que revisar que las “muelas” de las ruedas no sufran un desgaste excesivo. Además como en el caso del modelo con motores, el pozo necesita una tapa para evitar derramar el lubricante dentro. Otro inconveniente es que con el paso del tiempo, el animal surca un camino sobre el terreno. Este modelo apenas tiene aceptación entre los usuarios debido a la falta de recursos y mayor complejidad.



Figura 2.6. Bomba de Mecate de accionamiento animal. (www.ropepumps.org)

2.3.1.3.- Modelo con molino de viento.

Si aprovechamos la fuerza del viento para generar el movimiento de la rueda de manera similar al accionamiento animal, podemos extraer buena cantidad de agua. La aerobomba de Mecate combina una bomba de mecate con un molino de viento, basado en el modelo holandés CWD 200.

Hay dos modelos: el 270 que funciona con vientos que cambian de dirección dentro de 270º, y el modelo 360 más eficaz, que abarca todos los ángulos.

Hay que tener en cuenta que la zona geográfica limita mucho el uso de esta instalación, por ello conviene estudiar previamente si en la zona hay suficiente viento para justificar la instalación. Con un anemómetro sobre un poste podemos llevar un seguimiento preciso. Una vez decididos por este modelo, deben usarse molinos de viento pequeños y sencillos, capaces de aprovechar velocidades de viento de 3,5m/s.

La gran ventaja es que en una buena zona de viento, prácticamente la autonomía que tenemos es ilimitada, pudiendo extraer agua incluso de noche. Pero la instalación es compleja, más costosa y requiere de un mantenimiento periódico donde principalmente se engrasan los engranajes, que lo puede realizar el usuario. Su instalación se ha simplificado, tanto que es 1/3 más ligera que una aerobomba convencional (pesa 80-160kg). También su coste es 3 o 4 veces menor. Como opción se le puede montar un generador económico con unas baterías.



Figura 2.7. Bomba de Mecate accionada por molino de viento. Modelo 270.
(www.ropepumps.org).

2.3.1.4.- Modelo con bicicleta.

Este modelo aprovecha el accionamiento de la rueda mediante el pedaleo transmitido por una bicicleta. La ventaja es que el tiempo de bombeo se puede mantener en periodos más largos que si la accionáramos mediante una manivela. Pero frente al modelo tradicional, el coste de la instalación se incrementa en más de un 30%.

Su estudio completo se detallará en el próximo tema.



Figura 2.8. La bici-bomba de mecate. (CITA, 2001).



Figura 2.9. Fotografía Bici-bomba de Mecate. (Miraflor , Esteli 2008).

2.3.1.5.- Modelo con motores eléctricos, diesel o de gasolina.

Con la ayuda de un motor de accionamiento eléctrico, un motor a gasolina o un motor diesel, podemos hacer girar fácilmente la rueda, simplemente acoplándolo al eje. El modelo más eficaz es el motor eléctrico, porque es más sencillo de reparar (basta prácticamente con cambiar escobillas) y más económico pero precisa de una fuente de alimentación cercana o un grupo generador. Con una potencia de 500W podemos alcanzar grandes profundidades en torno a los 50 metros. Si no disponemos de electricidad, la solución más razonable parece utilizar un pequeño motor a gasolina como el que pueden llevar una moto-sierra o una mini-moto, suficiente con 0,5 a 1 CV según la profundidad. Como inconvenientes tenemos el incremento de costes, complejidad de mantenimiento y aumenta la probabilidad de contaminar el pozo por un vertido de combustible accidental.

Según su tipo se denominan: *bomegas*, bomba de mecate con motor a gasolina; *bomelec*; bomba de mecate con motor eléctrico.



Figura 2.10. Bomba de Mecate con motor de gasolina (Nicaragua, 2009).

Este modelo de bomba no ha tenido mucha acogida. Sin embargo para poder extraer agua a grandes profundidades donde el esfuerzo humano es insostenible, la incorporación de motores amplía el uso de la bomba de mecate.

2.3.1.6.- Modelo con placa solar.

Otra forma de alimentar un motor eléctrico, si carecemos de un generador o una línea eléctrica cercana, es mediante la utilización de una placa fotovoltaica que nos genere la suficiente electricidad para accionar el motor. Podemos aprovechar una edificación cercana para instalar en su tejado el panel solar, de posición fija u orientable manualmente. Existen paneles que se orientan automáticamente según en qué posición se encuentre el sol pero son demasiados caros.

El modelo solar requiere además otros componentes electrónicos como pueden ser conversores, reguladores y baterías por lo que su dependencia con un administrador exterior es demasiado elevada, alejándose bastante del concepto VLOM. Además días nublados no tendremos generación alguna de electricidad.

2.3.1.7.- Modelo para el bombeo no vertical.

No siempre se requiere extraer agua directamente de un pozo escavado, sino que se pretende aprovechar un río, una presa o un canal, cercano para utilizar su agua, elevándolo pendiente arriba. Con dar la inclinación necesaria la tubo de subida, aprovechando el relieve existente, podemos adaptar fácilmente la bomba tradicional a este tipo de necesidad. Además ganamos en comodidad e mantenimiento, ya que tenemos más accesible los elementos sumergibles que en el modelo tradicional. En este modelo, es recomendable añadir un tubo guía completo, para evitar el temprano deterioro de la cuerda y los pistones que sin el rozarían constantemente con el terreno.

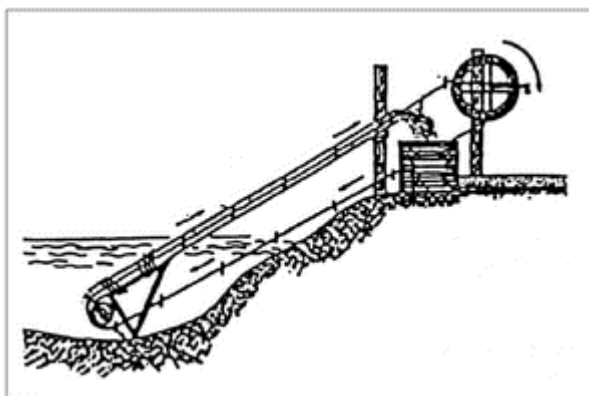


Figura 2.11. Bomba de Mecate no vertical (www.cubasolar.cu).

2.4.- Potencia humana aplicada al manejo de bombas manuales de agua.

Este análisis pretende comprender la capacidad humana de esfuerzo en distintas condiciones de edad, sexo, postura tomada, temperatura ambiente,... para razonar la utilización del modelo concreto de Bomba de Mecate en modo accionamiento con brazos o modo accionamiento con las piernas.

Para medir el esfuerzo desarrollado por el cuerpo humano, se utiliza un ergómetro. Con este aparato se puede tanto medir el esfuerzo que desarrollamos con los brazos sobre una manivela como el esfuerzo aplicado con las piernas sobre unos pedales. Además podemos operar en posición sentada, tumbados o de pie.



Figura 2.12. Medición del esfuerzo en un ergómetro (MELLEROWICZ, 1984).

Estos datos de fuerza obtenidos, junto con otros como las revoluciones por minuto, la capacidad pulmonar, la presión arterial y la frecuencia cardíaca recrean un mapa de funcionamiento personal que nos da una idea de nuestra potencia aplicada en un determinado trabajo. La temperatura ambiente, las condiciones del lugar de trabajo y la alimentación son factores importantes a tener en cuenta, para poder alcanzar ese nivel medio dentro del grupo de trabajo al que pertenezcamos. Pero todo el esfuerzo depende del estado de entrenamiento de nuestro organismo, no sirve estar bien alimentados, tener buenas condiciones ambientales y buena capacidad corporal si llevamos una vida demasiado sedentaria llena de comodidades.

Otro factor fundamental es el peso corporal. Así por ejemplo un esfuerzo igual absoluto de 100W para una persona de 50 Kg de peso es un esfuerzo relativamente mucho mayor que para una persona de la misma edad, pero con 80 Kg de peso.

Si medimos la capacidad de esfuerzo medio relativo, para un individuo que emplea una manivela en condiciones óptimas de temperatura, humedad relativa, y con un número correspondiente de rpm, obtenemos:

Capacidad de esfuerzo físico de larga duración en hombres....2 W/Kg. (20-30años)

Capacidad de esfuerzo físico de larga duración en mujeres.....1,5W/Kg. (20-30años)

Mientras que si medimos la capacidad de esfuerzo medio relativo, para un individuo que emplea unos pedales, en iguales condiciones, obtenemos:

Capacidad de esfuerzo físico de larga duración en hombres....2, 67 W/Kg. (20-30años)

Capacidad de esfuerzo físico de larga duración en mujeres.....2 W/Kg. (20-30años)

Estos valores son cifras máximas que se verán mermadas en las situaciones de trabajo reales por muchos condicionantes. Además de los mencionados anteriormente, también debemos considerar que en ocasiones el lugar del pozo se haya lejos del poblado donde reside el individuo, teniendo este que realizar un largo desplazamiento para obtener el agua diaria.

Si obtenemos un abanico de datos a diversos individuos de edades y sexo diferentes, podemos realizar una tabla resumen, donde tendremos una primera idea de potencia por tipo de individuo. De esta manera, si pretendemos adaptar una bomba manual para el uso de un individuo concreto, sabremos que características ha de tener la instalación para un correcto aprovechamiento de tal recurso.

	Parte del cuerpo empleada	Potencia desarrollable
Hombre	Piernas: pedaleo	100 W
	Brazos: manivela, palanca	70 W
Mujer	Piernas: pedaleo	75 W
	Brazos: manivela, palanca	50 W
Niña/niño	Piernas: pedaleo	65 W
	Brazos: manivela, palanca	40 W

Figura 2.13. Tabla de potencia desarrollable en el empleo de bombas manuales en países del tercer mundo. (TOMILLO, 2005).

Esta tabla es un forma parte de un promedio de datos en condiciones de elevada humedad relativa y temperatura ambiente, donde se han considerado que un hombre/mujer adulto tiene una edad entre los 20 y los 30 años y un niño/niña tiene 14 años.

3.- INSTALACIÓN

Este proyecto es continuación del montaje inicial de la bomba de mecate, realizada por el compañero TOBELL Arredondo, Javier.

Con el fin de conocer cada uno de los elementos que componen la bomba de mecate, es recomendable, desmontar y montar todas las partes del sistema. Este proceso es sencillo, si bien requiere alguna herramienta, no precisa de conocimientos previos de ninguna materia en general ni profesión en particular.

Con este informe lo que se pretende es buscar posibles puntos débiles, flaquezas o fallos de montaje en la instalación, a la vez de describir cada componente. Para ello se tratarán varios factores, tanto de diseño, como de puesta en práctica, así como ver si se ha producido un *“abuso tecnológico”* en la fabricación de determinados componentes de la Bomba de Mecate, alejándose por tanto de los principios básicos de pluralidad, facilidad y costes reducidos del criterio VLOM.

3.1.- INSTALACIÓN INICIAL.

Es por tanto el objetivo fundamental, el mejorar en lo posible todo el conjunto, actuando en determinados puntos concretos. Primero se hará una valoración del estado inicial de toda la instalación y más adelante se procederá a los cambios y mejoras, o posibles adaptaciones para futuros estudios.

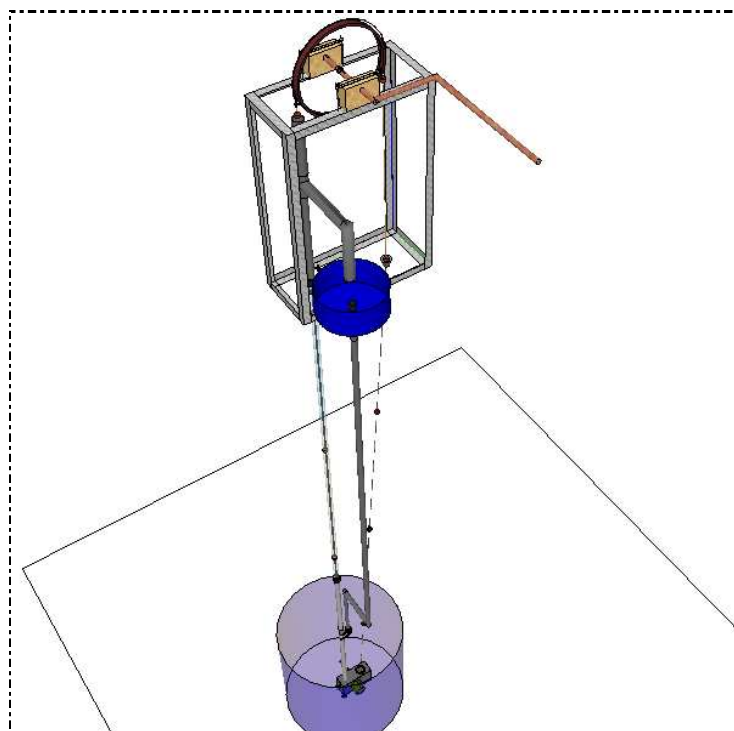


Figura 3.1. Instalación completa de la Bomba de Mecate.

Para conocer las distintas partes que forman la bomba, se van a estudiar de manera independiente, para así facilitar su estudio posterior.

3.1.1- POLEA TRACTORA O MOTRIZ

Dentro de este apartado vamos a la rueda, los cojinetes, la manivela, y la caja guía y el freno que son los elementos que configuran el movimiento a la bomba.

3.1.1.1.- Rueda

Es el elemento principal puesto que hace girar la cuerda con los pistones que a través de ella que se desplazan subiendo por un lado y bajando por el otro, con la fuerza de rozamiento creado por la rueda-pistones-cuerda. La rueda utilizada es de una motocicleta tipo Vespino de 194,5mm de diámetro. Para ser capaz de “atrapar” los pistones y mantener la tensión de la cuerda, sobre la llanta de la rueda se ha introducido la cubierta propia de la motocicleta, recortada longitudinalmente desechando la parte de rodadura y dejando tan solo la zona de contacto con la llanta. Estos dos anillos resultantes se han unido con cola de contacto, formado una “V” vista desde perfil donde se sostienen perfectamente los pistones y la cuerda a su paso.

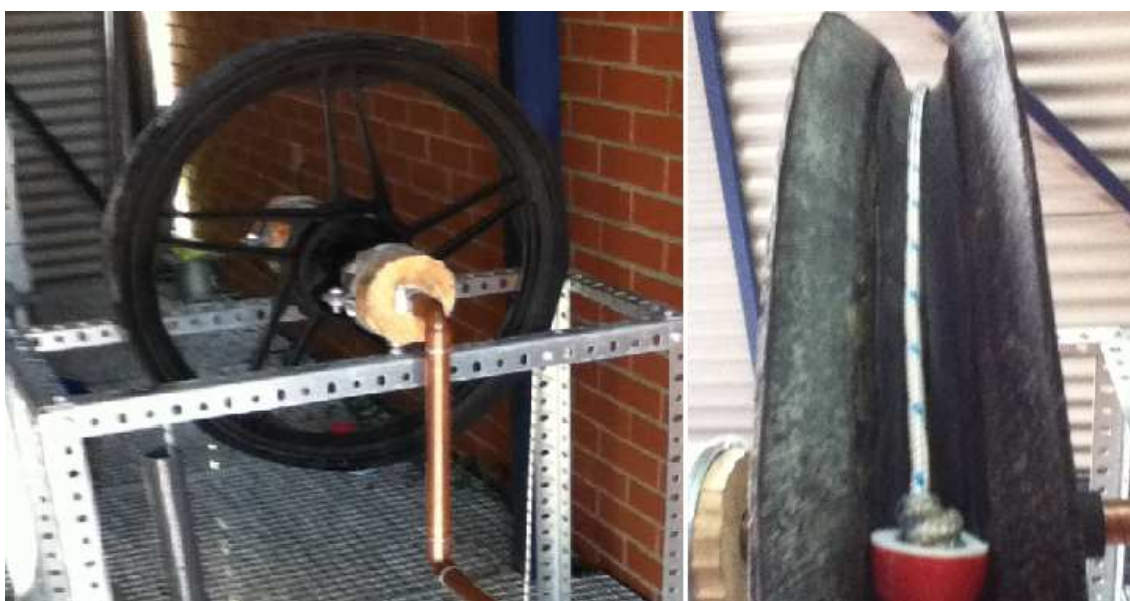


Figura3.2. Rueda montada sobre cojinetes. Vista de perfil con la cuerda y el pistón.

3.1.1.2.- Cojinetes

Son el elemento donde rota la manivela. Su materia es la madera y su forma inicial era circular, de 90mm de diámetro exterior frente a los 22mm de diámetro interior donde se introduce el eje que forma la manivela. Para poderse soportar sobre la base plana de los angulares que forman la estructura básica superior, se optó por utilizar abrazaderas de 90mm, que se pinzan entre ellas con dos tuercas hexagonales de 10mm y se mantienen con un tornillo de 8mm a la estructura base. Dos cojinetes, uno a cada lado de la rueda se encargan de que esta gire fácilmente.



Figura 3.3. Antiguos cojinetes. Vista de perfil. Detalle del soporte roto.

He de decir que la utilización de madera para esta pieza es todo un acierto, pero lógicamente tanto la geometría del propio cojinete como su sistema de unión a la estructura base son muy deficitarias. Con poco uso, comenzó a ceder la abrazadera, rompiéndose por la parte del tornillo que la sujetaba, como se aprecia en la fotografía derecha. También fueron apareciendo en la madera grietas que se fueron agrandando con el uso. Se trató mejorar la robustez del conjunto introduciendo dos nuevos tornillos que los asentaban mejor en la estructura. La falta de engrase también se podía apreciar por su sonido característico. Más adelante se fabricaran nuevos cojinetes de madera de pino, esta vez en geometría rectangular, más robustos y más estables. Como inconveniente, tendremos menor vida útil del cojinete si está fabricado en madera, porque con el paso del tiempo el agujero tenderá a desgastarse.

De todos modos, el mecanismo madera-metal es mucho mejor que en otro tipo de instalaciones donde se utiliza metal-metal de rozamiento libre. Para el caso de la adaptación de una bicicleta en la bomba de mecate, podemos utilizar los rodamientos que la rueda ya posee, aunque si bien es cierto que estos van a limitar su posterior mantenimiento y reposición, teniendo en cuenta lo visto anteriormente bajo el criterio VL0M.

3.1.1.3.- Manivela

Se trata de un ensamblaje de tubos de cobre que una vez soldados con soplete, confieren una pieza única. Sus dimensiones son proporcionales a los datos característicos tanto de la bomba de Nicaragua como los planos de Madagascar, acorde con el diámetro de la rueda que difiere de ambos modelos. El diámetro exterior del tubo es de 22mm.

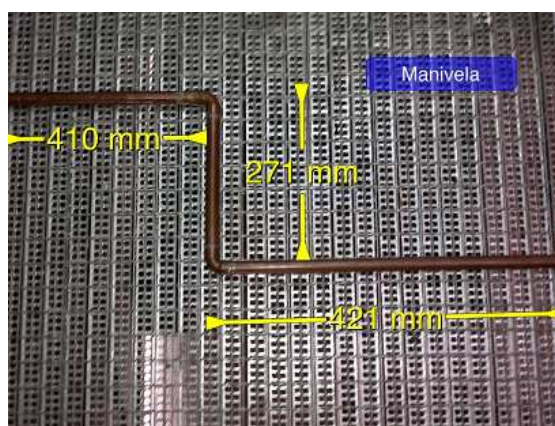


Figura 3.4. Manivela de cobre y cotas.

Funciona perfectamente, destacando únicamente la ausencia de puño que haría más cómodo su manejo, tal y como recomienda el manual de *Karl Erpf, The Rope Pump Concept RWSN*. Sin empuñadura, es nuestra propia mano la que desliza sobre la cubería de cobre, haciendo un tacto algo desagradable cuando tenemos la mano mojada, así introduciendo este elemento, con una pieza tubular, tal vez de plástico y bien engrasada, haríamos más confortable su uso, obteniendo de esta manera un mejor resultado.

3.1.1.4.- Caja guía

Esta pieza se encuentra totalmente sumergida en las profundidades del depósito. Exteriormente no es más que una caja de planchas de PVC mecanizado, que atraviesa longitudinalmente en su interior una botella de cristal (rellena de arena), la cual hace de guía o polea a la cuerda y los pistones justo antes de comenzar su camino de ascenso. Para dar peso al conjunto, la botella está llena de tierra. Es así como los pistones y la cuerda, primeramente entran cruzando un ensanchamiento tubular de 50mm, deslizan sobre el cuerpo curvo de la botella, y finalmente suben, ya portando agua, por el ajustado tubo de 32mm de diámetro exterior.

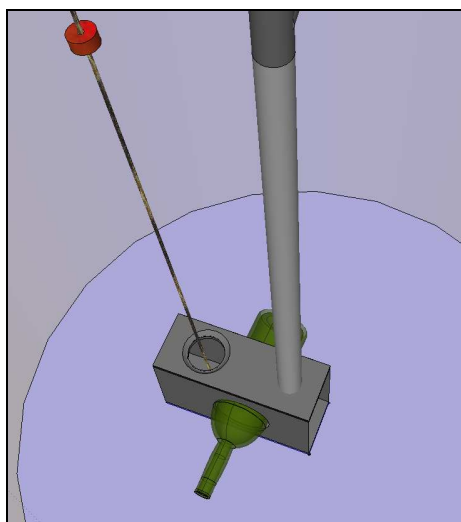


Figura 3.5. Conjunto caja guía, con su botella, cuerda-pistones y tubo de ascenso.

Este conjunto mecanizado requiere de cierta complejidad de fabricación. En el modelo de diseño de la bomba de mecate de Nicaragua se utiliza una pieza cerámica en sustitución de la botella y el conjunto se recubierta de cemento con la ayuda de un molde. Sin embargo es en el modelo de diseño de Madagascar donde si se emplea la botella con igual recubrimiento, contribuyendo así a la facilidad de su montaje.

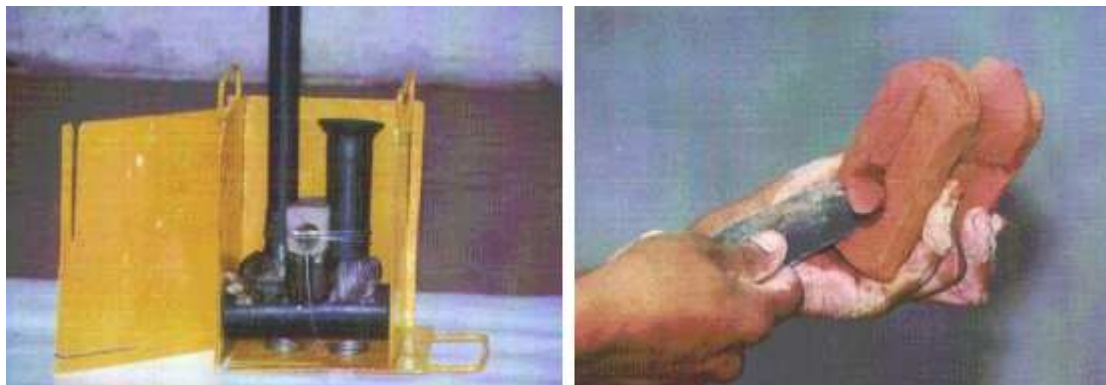


Figura 3.6. Molde caja guía de Nicaragua a falta del cemento. Guía de cerámica artesanal. (COSUDE, 1997).

3.1.1.5.- Freno

La bomba carece de sistema de freno. No se creyó oportuno para una distancia de tan solo 4 metros de altura. Si en el futuro se duplica esta distancia, haciendo uso del nivel superior de la plataforma, sería recomendable incluir este sistema de freno. Este actúa cuando dejamos de accionar la manivela y por tanto la rueda. El peso del agua que queda atrapado en las columnas que estaban subiendo, ejerce una fuerza contraria al movimiento, siguiendo las leyes de la gravedad. A mayor altura, mayor peso del agua atrapada y por tanto mayor fuerza que se convierte en un movimiento repentino en la manivela de sentido contrario al habitual.

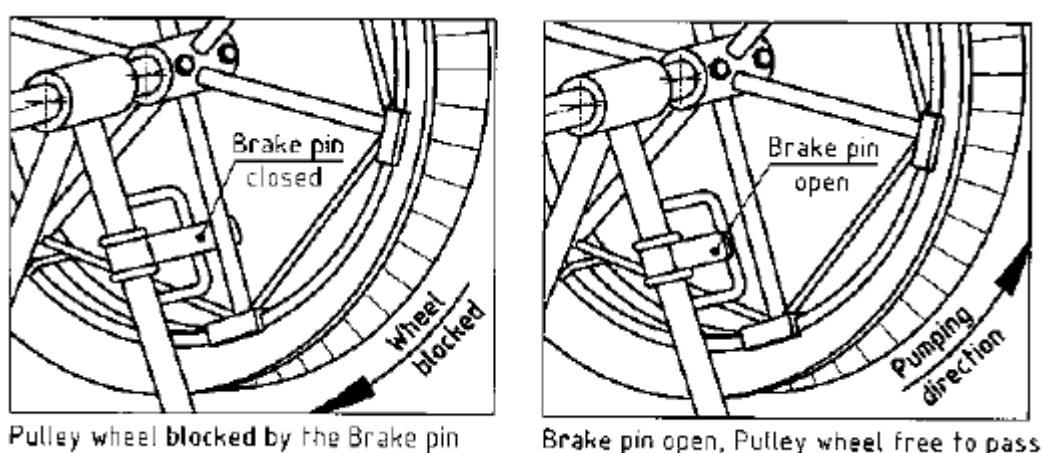


Figura 3.7. Freno sobre radio. Posición cerrada. Posición abierta. (ERPF, 2005).

Más adelante se hablará de la construcción de un freno de disco que no ha de confundirse con el de este apartado. El futuro freno se usará para reproducir diferentes alturas con la ayuda de un dinamómetro. Mientras que el freno de la figura superior es un freno de seguridad, para detener el accionamiento por “rebote” de la instalación.

3.1.2.- ESTRUCTURA SOPORTE

Está formada por la estructura base, la cubierta y los soportes complementarios y anclajes. Son el cuerpo donde se asientan el resto de elementos que componen la bomba.

3.1.2.1- Estructura base

La estructura base o la estructura superior, es la encargada de soportar el conjunto rueda-cojinetes-manivela y los tubos de subida próximos a la rueda y de toma de agua o surtidor. Básicamente consiste en 12 barras angulares de 12mm de anchura unidas por tornillería de 8mm. Las dimensiones del rectángulo que forma la estructura se pueden ver en la siguiente figura.



Figura 3.8. Estructura base con angulares, bomba de mecate.

3.1.2.2.- La cubierta

La cubierta no es más que una tapa superficial que delimita, a nivel del suelo, la estructura base de manipulación de la bomba de mecate, con el pozo de agua en cuestión. La instalación inicial carece de este elemento.

En principio la plataforma sobre la que se ha instalado la bomba de mecate tiene como suelos unos paneles de celosía que dejan caer objetos pequeños al nivel superior. A priori puede parecer que la cubierta es un detalle final del conjunto de la instalación de la bomba, casi sin importancia alguna. Pues bien, en el caso real, donde montásemos la bomba en un terreno de campo, fabricar una cubierta apropiada es fundamental, ya que es de esta manera como podemos garantizar una mínima higiene del agua que el pozo alberga. Si el pozo está descubierto, pueden entrar animales y defecar o morir en él. Simplemente con manipular la manivela con las manos sucias, podemos contaminar el agua del pozo. La cuerda al estar siempre mojada, salpica constantemente, al igual que cada pistón cuando alcanza el aire libre. Este goteo discurre por la estructura superior sucia de polvo y óxido, puede tener contacto con nuestra piel, y termina fluyendo de nuevo al pozo.

Por esto es importante tener en cuenta su instalación, aún sabiendo que está va a encarecer el coste final del conjunto de la bomba de mecate. Una buena cubierta es aquella que solo permite el paso del tubo de subida, por el que ascienden los pistones cargados de agua, y un tubo de bajada o tubo guía más ancho por el que baja la cuerda con los pistones de forma libre.

Si a los usuarios del pozo no les preocupa mucho la higiene, y tienen poco presupuesto, tienden a excluir la cubierta, contribuyendo a la contaminación de su pozo. Se puede concluir que el coste de su instalación es mucho menor que los inconvenientes que pueden surgir de no ponerla. Por otro lado, si comparamos la bomba de mecate con otros tipos, está seguirá siendo más viable, desde el punto de vista de la contaminación, frente a las otras. Una bomba accionada por un motor de combustión, si se vierte su combustible sobre el pozo, al rellenar su depósito, podemos contaminar su agua de forma irreversible.

El diseño del modelo de la bomba de Madagascar con su cubierta de hormigón, aventaja en este sentido al modelo de Nicaragua, por mejor aprovechamiento del agua que salpica y por su mejor aislamiento del pozo frente al entorno exterior.



Figura 3.9. Izquierda: losa o cubierta terminada. Derecha: polea motriz con tapa. (MANCEBO-BEGASSA, 2010)

3.1.2.3.- Soportes complementarios y anclajes

Para conseguir un refuerzo en las tuberías, debido a que estas por ser de PVC son algo flexibles, se introdujeron unas abrazaderas de 32mm en el tubo de bajada como en el de subida, unidas entre sí con varillas roscadas de 6mm, dando rigidez al conjunto. Aún que este sistema se repite en dos ocasiones, aún se aprecia que los tubos se *comban* ligeramente, siendo aconsejable mejorar estos refuerzos.



Figura 3.10. Abrazaderas de 32mm con varilla roscada 6mm.

3.1.3.- CUERDA CON PISTONES

3.1.3.1.- Pistones

Como elemento portador del agua que extraemos, es una de las piezas clave de la instalación. Para su fabricación se optó por hacer un molde en aluminio de dos piezas, donde se moldea plástico reciclado calentado previamente con cualquier utensilio de cocina. Esta pieza ha de viajar dentro de la tubería con un mínimo nivel de rozamiento, buscando el equilibrio entre conseguir elevar la mayor cantidad de agua sin perderla hacia abajo por las paredes del tubo, ajustándose al diámetro interior del propio tubo. Como un tubo genérico de PVC tiene de diámetro interior 27,2mm, los pistones utilizados se fabrican en un molde de 26,5mm siendo de esta manera el margen de 0,7mm de juego entre pistón-tubería. La literatura que podemos consultar, como puede ser *The Rope Pump Concept, Karl Erpf RWSN*, aconseja una cifra entre 0,5 y 1mm, dando así la nuestra por buena. Su forma es cónica por la parte superior, para facilitar su movimiento y plana por la inferior.



Figura 3.11. Pistón 26,5mm de plástico recién construido. Izquierda: sartén fundiendo plástico. Centro: molde con el plástico enfriándose. Derecha: acabado final a recortar.

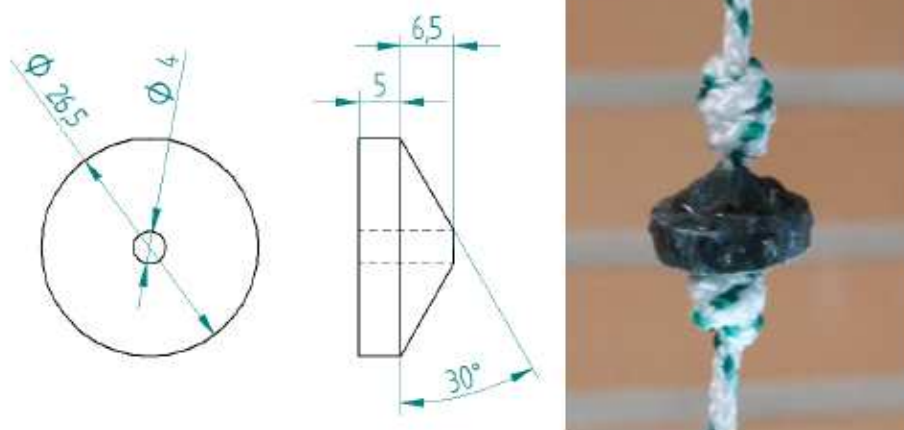


Figura 3.12. Dimensiones del pistón. Cuerda, nudos y pistón (TOBELLA, 2011).

El plástico del pistón nos garantiza durabilidad y buena calidad de fabricación al estar construido en un molde y ser compacto, apenas se han desgastado en estos 10 meses. Aún así, podemos fabricar pistones de diversos materiales de manera más artesanal. De este modo, la madera o el cuero viejo debidamente recortado a un tamaño válido pueden valer perfectamente para nuestra bomba. Las ventajas son evidentes, no necesitamos un complejo pre-proceso de mecanizado para fabricar el molde, ni una fuente de calor elevada para fundir el plástico a reciclar con el que construiríamos los pistones. Y como inconveniente, depende de nuestra destreza artesanal, que los pistones tengan las especificaciones deseadas para que funcionen todos por igual, sin pérdidas o rozamientos no deseados.

Se pueden realizar numerosos estudios dependiendo de si usamos un tipo de pistón u otro, y la forma que le queramos dar, probando por ejemplo figuras semi-esféricas, figuras planas... Por otro lado, aunque los pistones que posee la bomba son de plástico, en algunos pueden diferenciarse claramente distintas capas de diversos tipos de plástico, que no han fundido bien entre sí, acortando probablemente la vida útil del elemento. Hay que procurar utilizar un determinado tipo de plástico igual y conseguir una elevada temperatura en su fabricación para unificar mejor el material.

3.1.3.2.- Cuerda

Estos pistones irán debidamente anudados en la cuerda, a una distancia mínima de 1 metro, tal y como aconseja el documento anterior. Esta distancia se incrementará a medida que vaya aumentando la profundidad de nuestro pozo. La cuerda es de 4mm de espesor, y de longitud en torno a los 10 metros, teniendo en cuenta que cada nudo que hagamos antes y después de cada pistón le restará un mínimo de longitud. Hay que mencionar que un simple nudo puede torcer ligeramente el pistón y hacer que este no circule completamente perpendicular a su movimiento a través del tubo. Conviene por tanto hacer los nudos oportunos para evitar estas irregularidades.

Los distintos materiales de la cuerda, hacen que esta sea más flexible, permeable y duradera. La poliamida es un material idóneo por su resistencia teniendo en cuenta que es el elemento que mayor mantenimiento presenta, teniéndolo que reemplazar si el uso es diario cada año.

3.1.4.- TUBERÍA DE IMPULSO Y DE RETORNO

Dentro de este apartado podemos encontrar datos sobre las tuberías, el surtidor y los depósitos. Estos forman los caminos por los que ha de circular el agua o almacenarse.

3.1.4.1.- Tuberías

La tubería de impulso que se utiliza es de PVC de diámetro exterior 32mm, siendo su espesor de 2,4mm. Así restando esta cifra por ambos extremos tenemos una superficie libre interior de diámetro 27,2mm. Comúnmente se ha utilizado PVC gris, que es el material económico que podemos encontrar fácilmente en el mercado, pero la instalación posee 2,6 metros de PVC transparente para facilitar el estudio del funcionamiento de la bomba de mecate, cuando los pistones elevan agua a través de esta tubería.

La tubería de retorno, por la que se cierra el circuito sin fin de cuerda-pistones, hace las veces de guía para evitar rozamientos innecesarios y prolongar la vida útil. Básicamente son dos pequeños tubos, uno en el suelo superior, que ha sido ensanchando mediante calor y el cuello de una botella, de tubo 32mm. Y la entrada a la caja guía, como ya se vio en su apartado, de 50mm de diámetro.

Para garantizar que el agua que elevamos regresa al depósito y así conseguir condiciones de sistema estacionario donde a un determinado régimen de funcionamiento deseado, la cantidad del depósito permanece constante, se ha instalado un sistema de desagüe. Este posee un depósito superior tipo barreño de cocina, y baja por una tubería de 32mm de diámetro exterior, pasa por dos codos para darle acceso al depósito y posee en su extremo un caudalímetro. Este caudalímetro apenas tiene 11,5mm de diámetro interior lo que hace taponar el sistema encharcándolo aguas arriba. Este conjunto será motivo de análisis más adelante, mejorándolo convenientemente.

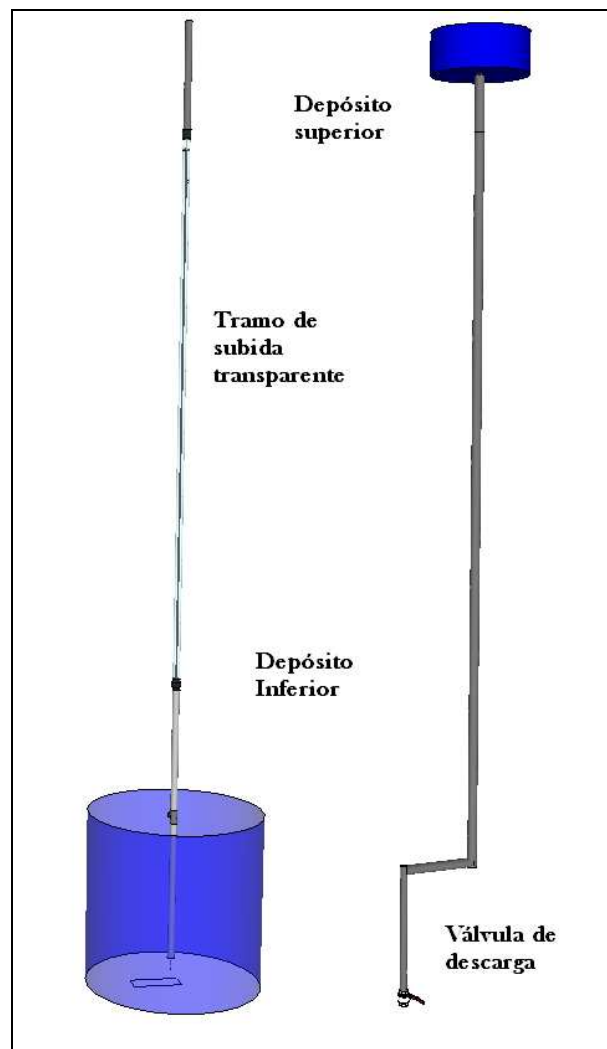


Figura 3.13. Tubería de subida, con tramo transparente de 2,6 metros. Tubería de desagüe.

3.1.4.2.- Surtidor

El surtidor es el conjunto de tuberías que vierten al exterior el agua elevada. En su construcción inicial se emplea un ensanchamiento brusco de tubo de 104mm de diámetro que desvía el agua en forma de “T” hacia un chorro formado por tubería de 50mm. Este ensanchamiento carece de tapa superior, lo que facilita que parte del agua salpique al exterior, perdiendo así una parte mínima pero significativa de caudal útil.

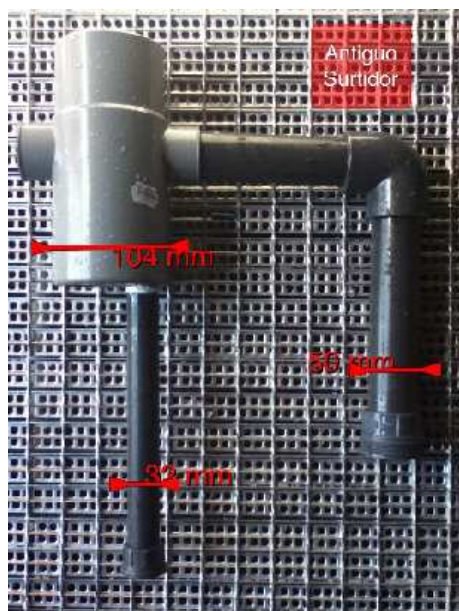


Figura 3.14. Surtidor vierte aguas. Sin tapa ni estrechamiento superior.

La dimensión del ensanchamiento es notablemente excesiva. Con un diámetro de 50mm para el uso de tubería de 32mm es suficiente. De esta manera evitaremos un gasto innecesario a la hora de adquirir esta pieza. Para las diferentes tuberías podemos hacer uso de la siguiente tabla.

Pumping head range	0 – 6 m	0 – 10 m	10 – 20 m	20 – 40 m [*]
Riser pipe Ø (ND imperial)	1 ½"	1"	¾"	½"
Riser pipe Ø (ND metric)	Ø 5.0 cm	Ø 3.2 cm	Ø 2.5 cm	Ø 2.0 cm
Upper pipe & spout Ø (ND imperial)	2"	1 ½"	1 ½"	1"
Upper pipe & spout Ø (ND metric)	Ø 6.3 cm	Ø 5.0 cm	Ø 5.0 cm	Ø 3.2 cm

Tabla 3.1. Recomendaciones según diámetro de tubería, profundidad, tubería de subida y salida (Karl Erpf, 2005).

Aprovechando que hemos introducido esta tabla, podemos observar también que para nuestra instalación en particular, con una altura de planta de 3,8 metros, podíamos haber utilizado tubería de 50mm de diámetro en vez de la actual de 32mm. La justificación es sencilla. Se prevé doblar esta altura en un futuro cercano, operando tanto desde la planta media como del nivel superior, aumentando las posibilidades de estudios posteriores. Así pasaríamos a tener 8 metros y diámetro adecuado para esta nueva altura.

3.1.4.3.- Depósitos

En la parte inferior tenemos el depósito principal de la instalación, que simula un pozo cualquiera. Su capacidad es de 350 litros y las dimensiones se pueden ver en la siguiente figura.



Figura 3.15. Depósito principal. Capacidad 350 litros. SCHÜTZ modelo AquaTON.

El depósito posee tapa roscada, siendo suficiente el hueco que da el tapón que se ha suprimido para el correcto funcionamiento de la bomba. Es una ventaja para garantizar la calidad del agua embasada, evitando de esta manera que le entre suciedad. Pero ha de estar bien alineado el depósito con la subida y sobre todo la bajada libre de la cuerda con los pistones si queremos evitar que estos al bajar peguen sobre la tapa y los podamos dañar.



Figura 3.16. Roce de pistón con la tapa del depósito. Caudalímetro a la derecha.

En la parte superior hay un pequeño barreño de 15 litros de capacidad que hace de sumidero para el sistema de desagüe. Carece de marcas de medida.

3.2.- ACCIONES DE MEJORA.

En los siguientes puntos lo que se pretende es detallar los pequeños problemas encontrados en la instalación inicial y solventarlos en la medida de lo posible. Habrá problemas de rápida intervención en los que no cabe mayor explicación que la lógica común y otros problemas que requieren de un estudio más pausado y detallado. Por esta razón este apartado se divide a su vez en dos partes bien diferenciadas.

3.2.1.- Acciones inmediatas.

En un primer instante se van a tratar aquellas acciones de mejora que no requieren a priori un estudio detallado de la parte que se trata. Esto quiere decir que por su sencillez de comprensión y estudio, se observa claramente la mejora sin necesidad de cálculos complejos. Esto no quiere decir que si se reemplaza un componente concreto a tratar en la mejora, su sustitución sea rápida, o su fabricación poco laboriosa.

3.2.2.1.- Normalización de tornillería.

Se ha observado que hay piezas como la tornillería que no están normalizadas entre sí, aumentando el número de herramientas necesarias para su posterior mantenimiento. Por esto se tratara en un primer momento de utilizar tornillería semejante, reemplazando varias piezas. Una alternativa para garantizar la comodidad y facilidad del mantenimiento es introducir tuercas tipo *mariposa*, que no requieren herramienta alguna en algunos elementos, como los soportes de los cojinetes, que son de vida útil corta. De esta forma estamos haciendo hincapié en el concepto VLOM (siglas en ingles, o BOMPO) por el que se rige que la operación y el mantenimiento ha de ser a nivel de poblado, realizados por el propio usuario.

Aún así, existen determinadas piezas, como piezas de medidas, que dada su complejidad y teniendo en cuenta que no afectan el rendimiento ni su funcionamiento, poseen tornillería específica que requiere un utillaje particular.

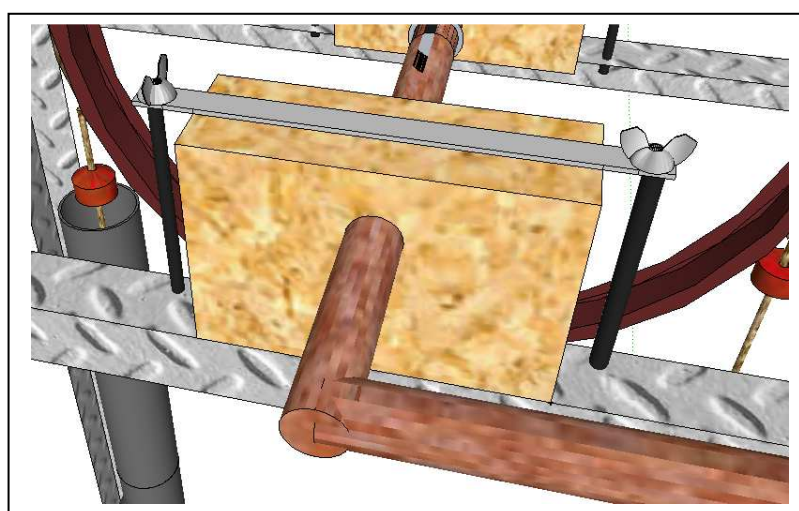


Figura 3.17. Detalle en SketchUP de la normalización de la tornillería.

3.2.2.2.- Sustitución de los cojinetes

Los antiguos cojinetes eran de construcción circular, con el agujero pasante del eje de la manivela en el centro. Para sujetar estos a la estructura principal era necesario usar unas abrazaderas de 90mm de diámetro. Lógicamente estas abrazaderas no han sido diseñadas para mantener este mecanismo concreto, y aunque los esfuerzos que se generan al actuar sobre la manivela para mover la rueda, no son grandes, son suficientes para terminar rompiendo esta pieza. Por esta razón, sumada por la complejidad que requiere construir cojinetes redondos y porque esa misma madera estaba agrietándose (probablemente por los golpes del cincel en su fabricación) se ha decidido sustituir estos por otros cojinetes cuadrados. Estos son más robustos, más estables sobre la superficie estructural de la bomba y más fáciles de construir y reemplazar.

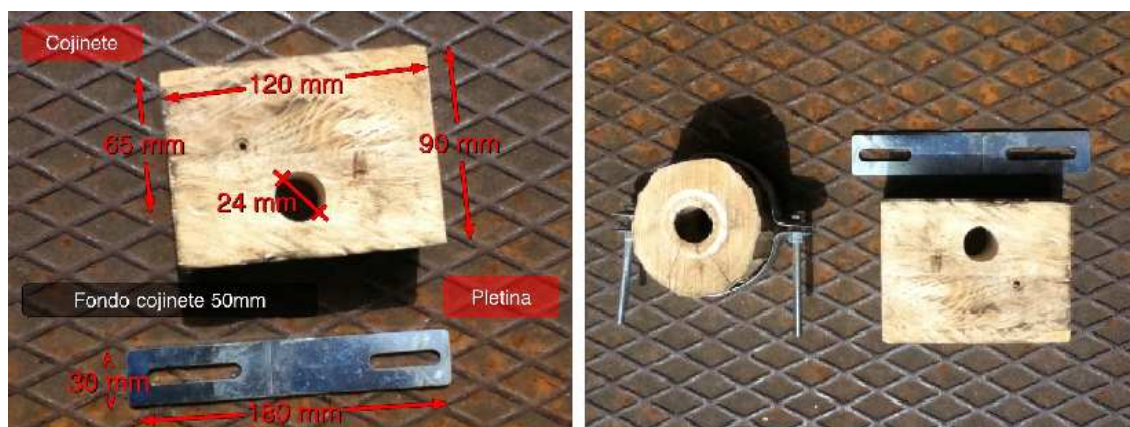


Figura 3.18. Nuevo cojinete y cotas. Comparación del antiguo cojinete redondo con el nuevo.

Se ha decidido hacer el orificio del eje de la manivela del valor de 24mm de diámetro puesto que el diámetro de esta era de 22mm y ha de tener el suficiente juego para no tener un rozamiento excesivo que pueda repercutir negativamente en el rendimiento de la bomba. Además se ha procurado engrasar todo el conjunto.

3.2.2.3.- Fortalecimiento de la estructura soporte y guiado del surtidor.

La estructura superior no está fijada al suelo, por lo que oscila según vamos accionando la manivela. Sería recomendable fijarla firmemente al suelo, bien por medio de una superficie adicional estable, como puede ser un palé de madera, o bien por medio de tornillería.

Una rápida solución ha sido fijarla a los paneles del suelo por medio de fuertes bridas de plástico. Estas dejan el conjunto firmemente sujeto al suelo y tiene la ventaja de la rápida retirada de estas si queremos hacer cualquier tipo de reforma en la instalación.

También se han instalado unos tirantes cruzados entre los tramos horizontales y los verticales que le dan mayor rigidez. Por medio de unos tornillos con tuerca se han fijado fácilmente.



Figura 3.19. Tirantes instalados sobre la estructura principal.

También se observó que el conjunto completo del surtidor tiende a combarse y no sube completamente vertical. Esto provocaba que no coincidiera la subida natural de la cuerda con la posición exacta de la rueda, originando un mínimo desplazamiento. Con la ayuda de unos tornillos y unas arandelas, y instalando unos soportes base sobre la estructura, se ha corregido este problema. Se fija la estructura al suelo, mediante tornillos y tuercas de 13mm.



Figura 3.20. Dos vistas de los dos soportes del surtidor.

3.2.2.- SEGUNDAS ACCIONES

Son el producto de una serie de cálculos y medidas que están claramente definidas por unos parámetros concretos. Con estas acciones lo que se pretende es mejorar determinadas cualidades que se apoyaran con los ensayos pertinentes.

3.2.2.1.- Sustitución del surtidor.

En un primer principio se había instalado un “surtidor vierte aguas” de unas grandes dimensiones. Aunque la sustitución de este conjunto de piezas de fontanería, podría incluirse en el apartado de primeras acciones, debido a su facilidad, existen una serie de parámetros de mejora definidos por unas variables (caudal, área, velocidad...) que requieren de algún cálculo matemático, para posteriormente compararlos con los datos experimentales.

Así es como se decide reemplazar el antiguo surtidor por otros dos modelos más normalizados, con piezas más genéricas, de distintos diámetros entre sí. De estos dos nuevos modelos, optaremos por el más favorable tomando como criterio el mejor valor obtenido de caudal “Q”, así como su relación con el precio de adquisición de sus materiales que lo componen.

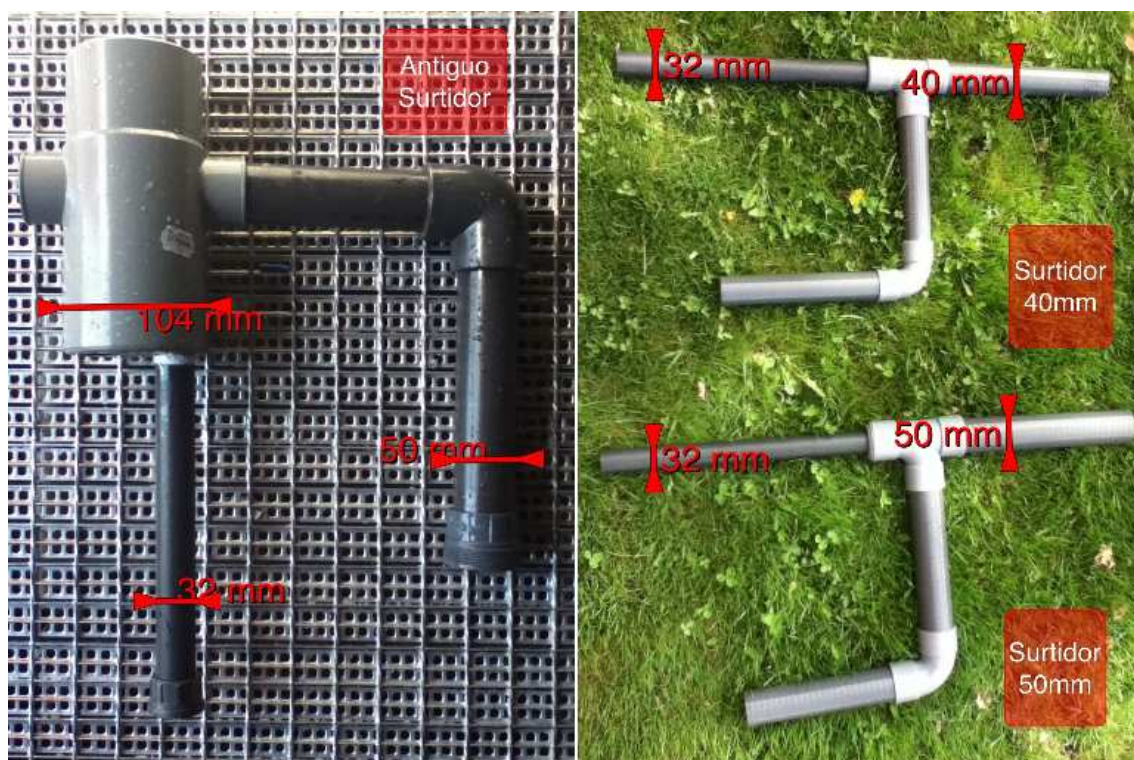


Figura 3.21. Antiguo surtidor a la izquierda. A la derecha; los dos nuevos surtidores.

Tiempo de llenado del depósito superior. Carga.

Posteriormente hemos comparado la capacidad de bombeo de la bomba para obtener el dato de caudal máximo práctico que da la Bomba de Mecate instalada. Para ello, utilizamos un cronómetro y un cubo de 13 litros de capacidad que incluye marcas cada 1 litro. Se ha comenzado la medición en el momento que la tubería da su caudal máximo. Los valores obtenidos se reflejan en la siguiente tabla:

	Tiempo configuración inicial
1	24 s
2	23 s
3	23 s
4	22 s
5	23 s
6	23 s
Σ	23 s

$$Q_{\max} = 0,565 \text{ l/s} \rightarrow V_{\max} = 1,02 \text{ m/s}$$

Este caudal lo obtenemos a máximo rendimiento, para una frecuencia constante de 75 r.p.m. y a una temperatura ambiente de 15°C.

Tras haber realizado una serie de cambios en la estructura de la bomba, se ha vuelto a medir tanto el caudal máximo como la velocidad máxima para compararlo con el estado inicial y ver si hay mejoras.

Estas mejoras se resumen en el apartado correspondiente. Si bien aquí realizo un pequeño resumen, que es el siguiente. Se modificaron los cojinetes siendo sustituidos los anteriores redondos de madera (agrietados) por otros rectangulares de madera seca de pino de 24mm de agujero en el eje para el paso de la manivela de 22mm y previamente engrasados. Se ha anclado firmemente la estructura al suelo porque inicialmente estaba solo presentada con tornillos sin tuerca alguna. Esta con el movimiento de la manivela se tambaleaba perdiendo el sistema eficacia. Se ha sustituido todo el conjunto de ensanchamiento de tubería a la subida, lo que se conocerá posteriormente como surtidor. Este ensanchamiento se ha realizado en dos partes diferenciadas por su diámetro como se va a ver más adelante, tanto por uno de 40mm como por otro de 50mm de diámetro.

Las condiciones de temperatura (15°C) y de frecuencia (75 r.p.m.) se han procurado semejantes al primer ensayo realizado.

Los nuevos datos obtenidos son los siguientes:

	Tiempo surtidor 40mm
1	24 s
2	23 s
3	24 s
4	24 s
5	23 s
6	24s
Σ	23,66 s

$$Q_{\max} = 0,549 \text{ l/s} \rightarrow V_{\max} = 0,997 \text{ m/s}$$

Podemos observar que aunque la estructura esta mejor anclada, los ejes tienen menos rozamiento y el surtidor es más compacto, aún estos datos están por debajo de los valores iniciales. Esto es debido a que la escasa diferencia de diámetro entre la tubería de subida (32mm) con el diámetro del surtidor (40mm) no es suficiente para absorber el caudal de agua que sube y ha de salir por el pitorro, rebosando cierta cantidad por la parte superior próxima a la rueda.

Por esta razón, y haciendo caso al manual de la Skat “*RWSN The Rope Pump Concept, Karl Erpf 2005*” vamos a realizar una última comparación cambiando el conjunto del surtidor de 40mm por uno más ancho de 50mm. De esta modificación obtenemos estos valores:

	Tiempo surtidor 50mm
1	22 s
2	22 s
3	23 s
4	22 s
5	23 s
6	22 s
Σ	22,33 s

$$Q_{\max} = 0,582 \text{ l/s} \rightarrow V_{\max} = 1,056 \text{ m/s}$$

Se pueden comparar los gastos de fabricación de un surtidor de $\varnothing 40\text{mm}$ frente a otro de $\varnothing 50\text{mm}$ en la tabla de presupuestos [3.3] que se encuentra más delante de este estudio.

Así conseguimos superar tanto los datos obtenidos con el surtidor de 40mm como con la instalación inicial donde teníamos una expansión aún mayor con un ensanchamiento de 104mm. Este ensanchamiento además de ser excesivo, y que encarece considerablemente nuestra instalación, hacía que la cuerda y los pistones a su paso, salpicaran agua en exceso y perdiéndose de este modo parte de la capacidad de caudal. Este goteo de agua que se perdía se podía apreciar muy bien cuando se han realizado medidas en la planta inferior.

3.2.2.2.- Fabricación nuevos pistones.

Se fabricaron nuevos pistones, con el mismo molde (figura 3.11) y con otros materiales plásticos para su posterior estudio. El pistón de plástico de inyección, se puede fabricar de un color que se distinga claramente como puede ser un tono rojizo, porque los actuales apenas se diferencian debido a sus tonalidades claras. Así facilitara el estudio, que en ocasiones se realizará con la ayuda de imágenes y videos digitales. Se ha apreciado poco desgaste de los pistones frente a los recién fabricados, habiendo funcionado en la bomba durante 10 meses de manera poco continuada. Se puede hacer una estimación de más de dos años de vida útil.

Si mejoramos el comportamiento del pistón dentro de la tubería, mediante nuevos pistones con menos holgura y mejor respuesta hidrodinámica, aumentaremos el rendimiento de la instalación, reduciendo de esta manera el esfuerzo a realizar para obtener una cierta cantidad de agua.



Figura 3.22. Izquierda; ejemplo de innovación. Cuerda con pistones sin nudos (MANCEBO-BEGASSA 2010). Derecha; pistones de madera (www.mayapedal.org).

3.2.2.3.- Aumento de capacidad del sistema de desagüe.

Para este punto se ha tenido que hacer un previo estudio teórico, del cual se han obtenido una serie de conclusiones y se ha dado la respuesta oportuna. Como comprobaremos, la elección fue la de sustituir el contador volumétrico por otro de mayor capacidad.

3.2.2.3.1.- Cálculos de Pérdida de Carga para el desagüe de la Bomba de Mecate

En la instalación inicial teníamos el problema de desbordamiento de aguas en el depósito superior, a causa de un sistema de desagüe de capacidad muy inferior al propio caudal de bombeo de nuestro equipo. Por ello se tratará de razonar matemáticamente la capacidad de la instalación para facilitar el retorno del fluido al depósito principal inferior, mediante el siguiente estudio.

Para la realización suponemos que la tubería va completamente llena de fluido. Y además la velocidad inicial en la superficie superior es despreciable. Para hacer esto posible, se ha instalado en la parte inferior una válvula de 1 ¼ de pulgada con la que logramos llenar tanto la tubería al completo como el depósito. Al ser su diámetro superior al diámetro de la tubería, este elemento también se puede despreciar. Inicialmente realizaremos los cálculos teóricos para pasar posteriormente a comparar la teoría con un experimento práctico. Es así como podemos hacer uso de la ecuación de la energía con las simplificaciones siguientes.

$$\rho \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad [3.1]$$

Siendo: g : es la aceleración de la gravedad (m/s^2)

ρ : es la densidad del fluido (kg/m^3)

h : altura de la instalación (m)

V : velocidad del fluido (m/s)

Si despejamos la velocidad de la forma siguiente, tenemos para un caso ideal:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [3.2]$$

$$V_{\max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3,03} = 7,71 \frac{m}{s}$$

Si lo que queremos hallar ahora es el caudal, con la siguiente expresión lo resolveremos de una forma muy sencilla:

$$Q = V \cdot S = V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [3.3]$$

Siendo: Q : caudal (m^3/s)

S : es la sección de la tubería (m^2)

D : es el diámetro (m)

$$S = \frac{\pi \cdot 0,0265^2}{4} = 0,000551 m^2 \quad Q = 7,71 \cdot 0,000551 = 4,25 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} = 4,25 \frac{l}{s}$$

Estos valores nos sirven únicamente para marcar el límite superior teórico de la citada instalación. Como veremos más adelante, los resultados finales serán bien distintos, muy por debajo de los primeros. La pérdida de carga que tiene lugar en una conducción representa la pérdida de energía de un flujo hidráulico a lo largo de la misma por efecto del rozamiento. Su expresión general caracterizada para la instalación toma la siguiente forma:

$$\rho \cdot g \cdot h - \Delta P_{\text{tubería}} - \Delta P_{\text{entrada}} - \Delta P_{\text{Estrechamiento}} - \Delta P_{\text{1codo}} - \Delta P_{\text{2codo}} - \Delta P_{\text{cauda lim etro}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad [3.4]$$

Vamos a considerar los cálculos quitando previamente el caudalímetro. Su diámetro es muy inferior al de la tubería, del orden de 2,3 veces más estrecho. Si lo hubiésemos tenido en cuenta y el fabricante no nos pudiera indicar el valor de K, lo que haríamos sería contemplar el total de la pieza como un estrechamiento brusco de sección y un posterior ensanchamiento brusco de sección.

Es necesario distinguir los diferentes elementos de los que se compone la tubería de desagüe, puesto que en cada uno de ellos el fluido tiene un comportamiento que ha de estudiarse de manera independiente.

- **Pérdidas de carga en conducto rectilíneo**

En este apartado se comprenden los cálculos directos relacionados con los diversos tramos de tubería recta que posee la instalación de desagüe. Hay dos parámetros básicos que deberemos definir para poder continuar con estos cálculos:

Re Número de Reynolds; $\frac{\varepsilon}{D} = \varepsilon_r$ Rugosidad relativa de las paredes de la tubería

Cada material tiene un valor diferente de rugosidad, debemos consultar en la tabla, para obtener la rugosidad del PVC, que es: $\varepsilon = 0,0015\text{mm}$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,0015\text{mm}}{26,5\text{mm}} = 0,0000566$$

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot D \cdot V}{\mu} \quad [3.5] \quad \text{si } \text{Re} \leq 2300 \text{ Flujo laminar}$$

Siendo: ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

V : velocidad del fluido (m/s)

D : diámetro de la tubería (m)

$$\mu: \text{viscosidad dinámica del fluido} \left(\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right) = \left(\frac{\text{kg} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right) = \left(\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right)$$

De nuevo debemos consultar el valor de la viscosidad del agua para una determinada temperatura ambiente. Para ello tomamos la referencia de 15°C. El valor de la velocidad lo hemos obtenido tras una serie de iteraciones realizadas en una tabla de Excel. Así hemos concluido que el valor es de $V=3,032\text{m/s}$.

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot D \cdot V}{\mu} = \frac{999,19[\text{Kg}/\text{m}^3] \cdot 0,0265[\text{m}] \cdot 3,032[\text{m}/\text{s}]}{0,001139[\text{Kg}/\text{m} \cdot \text{s}]} = 70485,44$$

Con este resultado estaríamos en una zona de transición para una tubería lisa, según podemos apreciar en el *Diagrama de Moody*, donde al introducir el dato del *Número de Reynolds* y el de la *Rugosidad Relativa*, obtenemos el *Coefficiente de Fricción f*. Así tenemos que $f = 0,01962$. Para terminar utilizaremos la expresión de la fórmula de Darcy y obtenemos la pérdida de carga para el conducto rectilíneo.

$$\frac{\Delta P_{\text{tubería}}}{\rho \cdot g} = h_{\text{tubería}} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad [3.6]$$

$$h_{\text{tubería}} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} [\text{m}] = 0,01962 \cdot \frac{3,26}{0,0265} \cdot \frac{3,032^2}{2 \cdot 9,81} = 1,131\text{m}$$

- **Pérdidas localizadas o accidentales**

Además de las pérdidas de carga por rozamiento, se producen otro tipo de pérdidas que se originan en puntos singulares de las tuberías (cambios de dirección, codos, juntas...) y que se deben a fenómenos de turbulencia. La suma de estas pérdidas de carga accidentales o localizadas más las pérdidas por rozamiento dan las pérdidas de carga totales.

Pérdidas en una entrada encañonada

La conexión entre el depósito superior con la tubería de desagüe no es lisa, ni uniforme, sino que presenta una intrusión evidente dentro del depósito superior. La forma que le caracteriza se denomina *entrada encañonada* y posee una k conocida de valor 1. De esta manera obtenemos:

$$h_{ec} = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 1 \cdot \frac{3,032^2}{2 \cdot 9,81} = 0,469\text{m} \quad [3.7]$$

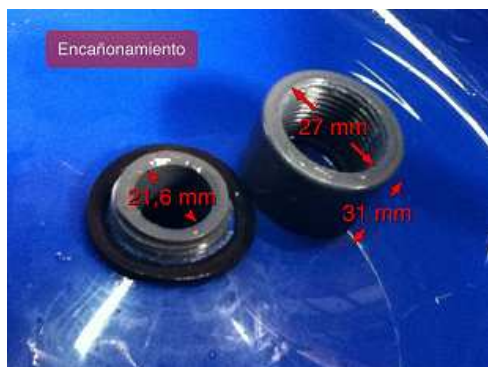


Figura 3.23. Detalle del encañonamiento.

Pérdidas en expansiones y contracciones bruscas

A la altura del depósito superior, se encuentra una pieza roscada que hace las veces de unión entre el depósito con la propia tubería de bajada. Esta pieza es mucho más estrecha que la tubería, es decir, existe un cambio brusco en el diámetro de la tubería. Pasaremos a dividir su estudio en las siguientes dos partes.

1- Estrechamiento brusco de sección. Contracción brusca (cb).

El flujo al llegar al estrechamiento continúa convergiendo después de la embocadura durante una cierta distancia. Los valores de K se obtienen de la siguiente manera:

$$K_{cb} = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{0,0216^2}{0,0265^2}\right) = 0,141 \quad [3.8]$$

$$h_{cb} = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 0,141 \cdot \frac{3,032^2}{2 \cdot 9,81} = 0,066m \quad [3.9]$$

2- Ensanchamiento brusco de sección. Expansión brusca (eb).

Aunque la tubería se ensanche bruscamente, el flujo lo hace de forma gradual, de manera que se forman torbellinos entre la vena líquida y la pared de la tubería, que son la causa de las pérdidas de carga localizadas.

La ecuación que vamos a utilizar proviene de la *Ecuación de Bernoulli* y son las siguientes:

$$K_{eb} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 = \left(1 - \frac{0,0216^2}{0,0265^2}\right)^2 = 0,113 \quad [3.10]$$

$$h_{eb} = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 0,113 \cdot \frac{3,032^2}{2 \cdot 9,81} = 0,053m \quad [3.11]$$

Como resultado, podemos concluir con la suma de ambas pérdidas de carga.

Codo 90º

Si quisiéramos hacer uso de las ecuaciones generales para el cálculo de la K, resolveríamos lo siguiente:

$$K = 0,388 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{R}{d}\right)^{0,84} \cdot Re_D^{-0,17} \quad [3.12]$$

Siendo:

$$\alpha = 0,95 + 4,42 \cdot \left(\frac{R}{d}\right)^{-1,96} \geq 1 \quad [3.13]$$

Como las piezas que tenemos se encuentran altamente normalizadas en múltiples tablas, simplemente cogeremos el valor necesario para los cálculos posteriores. Consultando en la tabla vemos que para un codo de 90° de radio corto la K vale 0,90. La pérdida de carga puede expresarse en función de la altura cinética corregida mediante el coeficiente empírico K.

$$K = \frac{h_c}{\frac{V^2}{2 \cdot g}} \Rightarrow h_c = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 0,90 \cdot \frac{3,38^2}{2 \cdot 9,81} = 0,422m$$

Como ambos codos tienen la misma configuración, el fluido se comportará de igual forma en ambos elementos. Es por ello que la suma de ambas pérdidas de carga tiene el resultado siguiente:

$$h_{codos} = 0,524 \cdot 2 = 0,844m$$

Ahora ya estamos en disposición de calcular la velocidad, sustituyendo los valores anteriores en la siguiente expresión (fórmula 3.4):

$$\rho \cdot g \cdot h - \Delta P_{tuberia} - \Delta P_{encañamiento} - \Delta P_{cb} - \Delta P_{eb} - \Delta P_{1codo} - \Delta P_{2codo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$$

$$\rho \cdot g \cdot h_{total} - \rho \cdot g \cdot h_{tuberia} - \rho \cdot g \cdot h_{encañ} - \rho \cdot g \cdot h_{cb} - \rho \cdot g \cdot h_{eb} - \rho \cdot g \cdot h_{codos} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$$

$$\rho \cdot g \cdot (h_{total} - h_{encañ} - h_{tuberia} - h_{cb} - h_{eb} - h_{codos}) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$$

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{total} - h_{tuberia} - h_{cb} - h_{eb} - h_{ec} - h_{codos})} \quad [3.14]$$

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (3,03 - 1,131 - 0,469 - 0,066 - 0,053 - 0,844)} = 3,031 \frac{m}{s}$$

$$Q = V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 3,031 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0265^2}{4} = 1,672 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} = 1,672 \frac{l}{s}$$

3.2.2.2- Ensayos.

Trataremos de comprobar prácticamente los resultados obtenidos anteriormente de forma teórica para demostrar que la parte de la instalación de bajada de aguas al depósito principal (inferior de 350 litros), sin el caudalímetro, es válida.

Tiempo de vaciado del depósito superior. Descarga.

Para la realización de los siguientes ensayos, se ha utilizado una válvula de 1 ¼ pulgadas al final de la instalación en la parte inferior, para conseguir así al cerrarla, llenar la tubería por completo y el depósito superior. Es de esta manera, como con la ayuda de un cubo de medida que marca cada litro hasta el valor de 13 litros, podemos contabilizar el tiempo necesario en llenarse, mientras abrimos y cerramos esta válvula. Como este cubo de 13 litros es de capacidad inferior al depósito superior de 15 litros, nos aseguramos que arriba aún hay agua y el caudal durante ese periodo de tiempo ha permanecido constante.



Figura 3.24. Detalle válvula de cierre del conducto de bajada, antes del depósito principal.
Cubo con marcas de medida.

Las siguientes mediciones se han realizado llenando el cubo a 7 litros y midiendo el tiempo de llenado.

	Td sin Caudalímetro
1	4 s
2	4 s
3	5 s
4	4 s
5	4 s
6	4 s
Σ	4,16 s

$$Q_{\max} = 1,68 \frac{l}{s} \rightarrow V_{\max} = 3,049 \frac{m}{s}$$

Hemos comprobado que efectivamente los datos teóricos se asemejan bastante a los prácticos, puesto que hemos tenido en cuenta todas las piezas que conforman la instalación de

desagüe. Como conclusión, al quitar el caudalímetro que teníamos puesto, el sistema responde adecuadamente.

Pérdidas de carga incluyendo el caudalímetro

Para determinar un futuro caudalímetro válido para la adquisición de datos de nuestra instalación, vamos a incluir en la ecuación de la velocidad los valores de las “h” de pérdidas del antiguo caudalímetro. Al igual que hicimos en el encañonamiento, podemos asimilar que el caudalímetro se asemeja primero a un estrechamiento brusco de sección y a un posterior ensanchamiento brusco de sección. Es decir, nos encontramos dentro del apartado de pérdidas localizadas. Así los resultados que obtenemos serán los descritos con las formulas anteriores, y son:

$$K_{cbc} = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{0,0115^2}{0,0265^2}\right) = 0,341 \quad [3.15]$$

$$h_{cbc} = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 0,341 \cdot \frac{2,71^2}{2 \cdot 9,81} = 0,160m \quad [3.16]$$

Siendo: h_{cbc} = la h de la contracción brusca del caudalímetro

$$K_{ebc} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 = \left(1 - \frac{0,0115^2}{0,0265^2}\right)^2 = 0,659 \quad [3.17]$$

$$h_{ebc} = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 0,659 \cdot \frac{2,71^2}{2 \cdot 9,81} = 0,309m \quad [3.18]$$

Siendo: h_{ebc} = la h de la expansión brusca del caudalímetro

Del mismo modo que antes, la velocidad la hemos calculado iterando varias veces en una tabla de Excel donde se incluyen todos los cálculos, incluyendo el número de Reynolds y el valor de la f del diagrama de Moody. Introduciendo estos datos con todos los anteriores, codos y demás objetos obtenemos los valores de V y Q siguientes:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{total} - h_{tubería} - h_{cb} - h_{eb} - h_{ec} - h_{codos} - H_{cbc} - H_{ebc})} \quad [3.19]$$

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (3,03 - 1,131 - 0,469 - 0,066 - 0,053 - 0,844 - 0,160 - 0,309)} = 2,713 \frac{m}{s}$$

$$Q = V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 2,713 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0265^2}{4} = 1,497 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} = 1,497 \frac{l}{s}$$

Vemos que el valor es inferior al incluir el caudalímetro. A priori podemos afirmar que ese caudalímetro con esta sección interna es válido para nuestra instalación puesto que el caudal de desagüe es mayor que el caudal de bombeo de la bomba, que está en torno al 1 litro/segundo.

Comprobación experimental.

Para comparar los datos teóricos hemos instalado el antiguo caudalímetro. Al principio, sin realizar ningún tipo de medidas, con el caudalímetro instalado y toda la configuración inicial montada (de codos y demás componentes), al bombear agua, en menos de 60 segundos inundamos el recipiente superior, encharcando el suelo. Por ello la capacidad del caudalímetro es aún menor a la aproximación que hemos realizado haciéndolo similar a un estrechamiento y ensanchamiento.



Figura 3.25. Fotografía acotada del viejo caudalímetro, marca “Elster”.

Por ello, he realizado una medición de tiempo de desagüe quitando los dos codos, con la ayuda de la válvula (para asegurar que toda la tubería va completamente llena), y con el caudalímetro. De esta manera la tubería va completamente recta, mejorando levemente las pérdidas de carga. Para hacer la medida se ha utilizado Y se ha realizado una medida con la ayuda de un recipiente nivelado con marcas a cada litro. Se ha dejado que se llene hasta los 6 litros. Los datos obtenidos son los siguientes:

	Tdescarga
1	29 s
2	28 s
3	27 s
4	28 s
5	27 s
Σ	27,8 s

$$Q_{\max} = 0,216 \frac{l}{s} \rightarrow V_{\max} = 0,391 \frac{m}{s}$$

De esta forma vemos que efectivamente no da un caudal lo suficientemente elevado para permitir que el caudal bombeado regrese nuevamente al depósito inferior. Por lo tanto este caudalímetro no es válido, probablemente porque su propio funcionamiento interno no es de la capacidad requerida. Una mala configuración de las palas de su turbina, puede ser la causa de su escasa eficiencia.



Figura 3.26. Izquierda; ensayo con medidas, configuración recta sin codos. Derecha; configuración sin válvula y directamente al nivel de agua del depósito principal.

También se comprobó que el sistema no sirve y se encharcaba, eliminando la válvula y haciendo que el tubo de salida del caudalímetro conectase directamente con el depósito dentro del nivel de agua.

3.2.2.2.3.- Configuración final de la instalación de desagüe.

Para los futuros ensayos se ha introducido un caudalímetro de 1 pulgada de diámetro (0,0254 metros). Este diámetro es de valor próximo al de la propia tubería, es decir, al diámetro interno de 27,5mm. Además de poder leer los diferentes valores de forma analógica, con precisión de $0,0001\text{m}^3$, este medidor volumétrico genera una salida de 1 pulso cada 1m^3 , que podemos introducir en un ordenador a través de una tarjeta de adquisición de datos para su posterior tratamiento monitorizado.



Figura 3.27. Detalle del nuevo medidor volumétrico. Configuración final de la instalación de desagüe de la bomba de mecate.

Este medidor volumétrico es uno de los costes más caros que se presentan en este proyecto, pero resulta imprescindible si se quieren hacer medidas precisas del comportamiento de la bomba. El coste de adquisición dependerá tanto del diámetro elegido así como de la capacidad de adquisición de datos.

Así se pretende encaminar este proyecto a una futura automatización general de la bomba, y los sistemas de que compone, y su estudio continuo por medio de múltiples sensores. Por esto, este proyecto es continuación del inicial y será parte del camino a seguir a los proyectos venideros.

Como ha comprobado en los cálculos, el caudalímetro que se había introducido al final de la bajada del desagüe, ofrecía un gran impedimento al agua circulante por ese recorrido, llegando a taponar el depósito superior y rebosando por los suelos. Esto era debido a que la sección interna del propio caudalímetro era de 11,5mm de diámetro, muy inferior a diámetro interior medio de las propias tuberías de valor 26,5mm. Las variables que se han tenido en cuenta son el *caudal de desagüe* Q_d así como la *velocidad de desagüe* V_d que se ha comparado tanto los valores teóricos como los prácticos.

3.3.- LA BICI-BOMBA DE MECATE.

Aunque forma parte de las acciones de mejora, debido a su transcendencia, se tratará como un punto a parte, dentro del apartado general de Instalación.

3.3.1.- Introducción

La idea es adaptar una bicicleta de BMX a la bomba de Mecate para trabajar más cómodamente sentado sobre un sillín y seguramente incrementar el rendimiento total de la instalación. El estado inicial es el siguiente que se puede observar en la figura 3.27. Esta bastante oxidada. De este mini-manual pretendo demostrar como con cualquier vieja bicicleta que tengamos, podemos mejorar la fuerza aplicada al eje de la rueda, aumentando de esta manera el rendimiento. Así podremos obtener agua en un pozo de más profundidad con mayor facilidad.



Figura 3.28. Fotografía del estado inicial de la bicicleta usada.



Figura 3.29. Detalle del estado de oxidación de la potencia de la bicicleta.

La restauración básicamente consiste en lijarla con una lija de agua de grano 400 y pintarla con una pintura anticorrosiva. Para pintarla se ha usado pintura para metal de color verde almendra y se ha pintado con la ayuda de un compresor con pistola, diluyendo la pintura con disolvente acrílico. Posteriormente se ha creado la plataforma sobre la que irá asentada. Para ello se han utilizado unos recortes de perfil de aluminio. Estos confieren a la estructura una rigidez excepcional y de esta manera facilitamos la movilidad de la instalación al ser el aluminio un material muy ligero frente a una estructura soldada de acero. Este aluminio extruido tiene la gran ventaja de que se puede ensamblar a nuestro antojo utilizando unos adaptadores que se atornillan a los carriles centrales de la pieza de aluminio evitando utilizar un grupo de soldadura. La desventaja es el precio elevado frente al coste de un soporte convencional en acero.

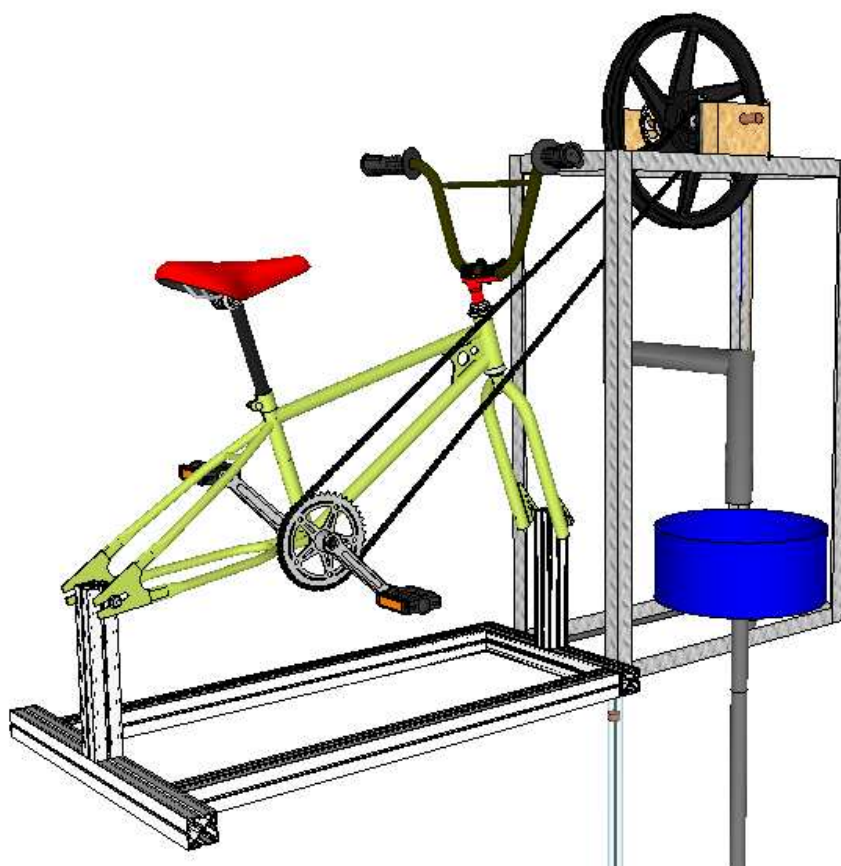


Figura 3.30. Representación en SketchUp del diseño final de la bici-bomba.

He elegido este modelo pequeño porque se adapta muy bien tanto a una persona adulta mujer u hombre, como a un niño. Y del mismo modo, el radio de sus ruedas es muy similar al radio que se ha utilizado en el diseño inicial con la rueda del Vespino.

No es necesario disponer de las ruedas de la bicicleta, se puede adaptar la rueda actual del Vespino añadiendo un piñón fijo al eje. Este paso se detallará más adelante.

3.3.2.- Restauración de la bicicleta.

En las siguientes fotografías vemos los pasos básicos de proceso:



Figura 3.31. Acabado lijado de la bicicleta. Fotografía general a la izquierda. Detalle de la tornillería de la potencia que une el cuadro al manillar.



Figura 3.32. Acabado pintado de la bicicleta. Se han reemplazado los tornillos del manillar. Se ha extraído el eje de pedalier, limpiado, engrasado y de nuevo colocado.



Figura 3.33. Acabado final sobre el soporte para poder pedalear libremente. Detalle de la sujeción trasera.

3.3.3.- Soporte de la bicicleta.

Para su construcción se han empleado 3,35 metros de perfil de aluminio extruido de 45mm de grosor. Además se han utilizado 8 piezas de unión, o angulares con tornillo Allen y tuercas de 13mm que fijan los recortes de aluminio entre si.

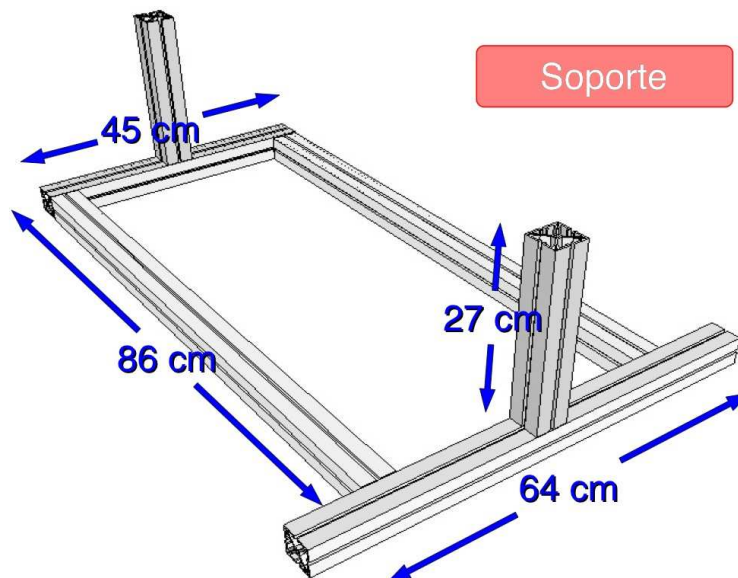


Figura 3.34. Cotas del soporte de aluminio de la bicicleta.

Tanto en el extremo vertical delantero como en el trasero, se ha hecho un agujero. Por este agujero pasa un tornillo que une la bicicleta a la estructura aprovechando los soportes originales donde debieran ir las ruedas (delantera y trasera de la bicicleta). De ahí que las dimensiones de ancho y largo sean las expuestas en la figura, variando según se utilice un modelo u otro de bicicleta.

Las dimensiones generales del modelo en cuestión de la bicicleta utilizada se detallan en la siguiente figura:

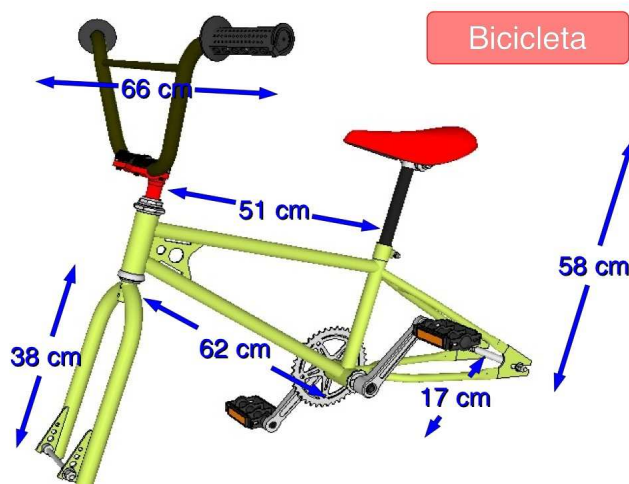


Figura 3.35. Cotas de la bicicleta de BMX usada para la bomba de mecate.

3.3.4.- Adaptación de la rueda de ciclomotor a la bici-bomba de mecate.

Vamos a aprovechar que disponemos de una rueda de ciclomotor útil, que mediante una serie de pequeñas y otras más complejas modificaciones, podamos adaptarla al nuevo método de accionamiento del equipo. Hemos dejado a un lado la antigua manivela de cobre para pasar a ejercer el trabajo con las piernas por medio de la pequeña bicicleta.

Para poder adaptar la rueda, he instalado un piñón fijo de 26 dientes, directamente al centro de la rueda de la moto. Este paso es sencillo, basta con taladrar cuidadosamente unos agujeros y mantener firmemente el piñón a la rueda por medio de unos tornillos. Pero para poner el disco de freno ha sido más complicado. Cuando la rueda giraba con la manivela de cobre, en la situación antigua, tenía dos piezas de PVC de tubería de 32mm metidas que encajaban bien dentro del eje de la rueda (eran dos porque dentro del eje de la rueda había dos diámetros distintos, en los bordes era de 27mm y en el centro de 32mm de diámetro). Solo encajaban, es decir, con fricción deslizaban y no iba a servir esa solución cuando se frene el disco y existan tensiones grandes. Así que he fabricado con un torno una pieza cilíndrica de acero, que va justa con la rueda y además no deja mucho margen al tubo de cobre (lo suficiente para poder sustituirlo por la manivela si se quiere), antes bailaba en exceso y solo estaba frenado con dos tornillos pasantes (había mucho juego, de 22mm del cobre a los 27,2mm de tubería interior de PVC).

La nueva pieza mecanizada, tiene un soporte en uno de sus extremos para albergar el disco de freno. Esta pieza la he adquirido en una tienda de recambios de mini-motos, nueva por un precio de 5 Euros. De esta manera, queda a un lado el piñón con la cadena, y al otro el disco de freno, con suficiente espacio disponible para poder fijar un sistema de frenado que sea compatible con un dinamómetro para poder medir así la fuerza que ejerzamos en todo momento sobre el eje de la bomba de mecate.



Figura 3.36. Rueda de ciclomotor con piñón. Las pinzas soportan la goma recién pegada.



Figura 3.37. ANTES. Izquierda: antiguo cojinete con eje de cobre más pieza de PVC recortada y fijada por un tornillo roscado a 10mm. Derecha: detalle de la pieza de PVC que lo soportaba.



Figura 3.38. AHORA. Disco y pieza mecanizada para encajar en la rueda, que soporta el disco y permite pasar el cobre. Detalle del conjunto con el disco montado que sustituye al PVC.



Figura 3.39. Detalle del conjunto disco y piñón montado sobre el eje de cobre, la pieza mecanizada y la rueda de ciclomotor. Derecha: vista de frente, con un pistón en la cuerda.

3.3.5.- La bici-bomba de mecate.

Una vez ha quedado la rueda perfectamente adaptada se ha pasado a ensamblar la bicicleta a la bomba de mecate. Para hacer esto posible, han sido necesarias dos cadenas de bicicleta de montaña, debido al largo recorrido que presenta el plato de la bicicleta al piñón de la rueda (la longitud total aproximada es de 2,6 metros de cadena). Había recuperado la antigua cadena pero fue preciso adquirir una nueva, la más económica de similares características de anchura y distancian entre eslabones. Esto es importante si no queremos que el conjunto de ambas cadenas, haga pequeños saltos cada vez que discurre por los piñones. Para su instalación es necesario ayudarnos de una herramienta que rompe y une la cadena, o “troncha-cadenas”.

Una vez hemos dejado la cadena lo bastante tensa, debemos procurar que este debidamente engrasada, al igual que el resto de componentes de la bomba.



Figura 3.40. Acabado final de la instalación de la bici-bomba de mecate.

Con esta instalación lo que se pretende es aumentar la fuerza que se ejerce sobre el eje, pasando de accionar la bomba con las piernas en vez de con los brazos. De esta manera, para la configuración de tubería de subida, que es de 32mm de diámetro, podemos aumentar la profundidad del pozo sin tener que sustituir esta tubería. Si el accionamiento fuera manual, según las tablas facilitadas por “The Rope Pump Concept, RWSN” este diámetro solo nos sería útil para una profundidad de 0 a 10 metros. Si aumentamos la profundidad, deberíamos disminuir el diámetro de la tubería a 25mm (sirviendo este para profundidades de 10 a 20 metros, mediante un accionamiento manual cómodo). Con la bicicleta podemos continuar aumentando la profundidad sin necesidad del sustituir la tubería de subida de agua de nuestra instalación.

La idea de incluir el disco, no es otra que la de frenar de la manera más precisa posible con la ayuda de un dinamómetro, el eje para simular distintas profundidades y caracterizar nuestra instalación en las distintas condiciones de altura, ampliando de esta manera el abanico de múltiples posibilidades de estudios para proyectos futuros.

3.3.6.- Construcción de un freno dinamométrico.

Como se ha mencionado anteriormente, se pretende construir un freno, que ajustado mediante un dinamómetro, nos ayude a simular diferentes alturas de profundidad. Para su construcción se han empleado distintos materiales que componen, una estructura soporte que se fija a la estructura de la bomba, y una parte móvil.

La parte fija se compone de un soporte metálico donde se desliza la parte móvil encerrada en un carril. Además está sujeta a la estructura principal de la bomba, cerca del campo de acción del disco, próxima al cojinete. La parte fija, está formada por distintas piezas de aluminio y acero, con tornillería de 13mm y múltiples agujeros que permiten diferentes adaptaciones a la bomba.

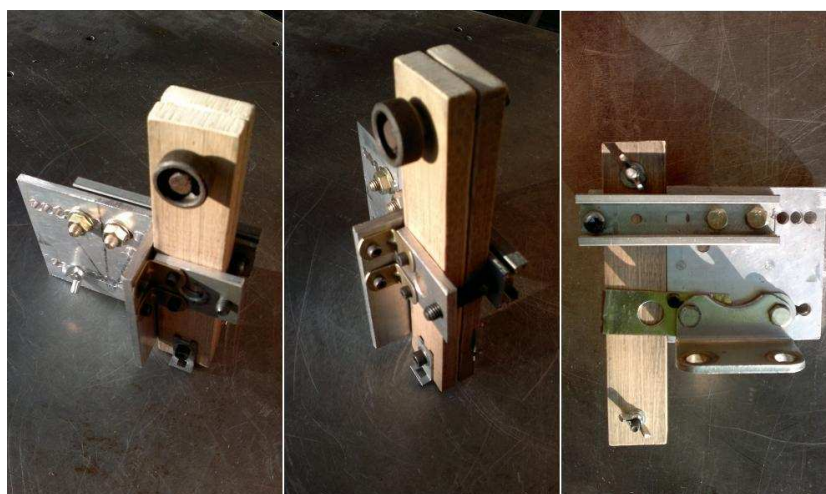


Figura 3.41. Vistas freno dinamométrico. Parte fija estructura de metal. Parte móvil de madera con tuerca circular y mariposas, que se pueden manipular con las manos.

La parte móvil, de madera, es la que hace contacto directo con el disco de freno. Esta a su vez, se compone de dos piezas de madera que en su interior llevan pegado cinta elástica y papel de lija de grano 220, asegurando una frenada controlada del disco. Para variar la intensidad, se regulan dos roscas manualmente según queramos aplicar mayor o menor fuerza.

En la parte inferior de la aparte móvil, existe un soporte donde va anclado el dinamómetro que inicialmente permanece en estado de reposo, listo para medir ante cualquier movimiento que le haga estirarse. Este está fijado inferiormente mediante una varilla roscada y una tuerca pasante, que permite su fácil ajuste.

Una vez este el freno dinamométrico debidamente instalado, si accionamos la bomba, al girar la rueda, también gira el disco de freno. Si aplicamos una fuerza determinada sobre el tornillo de la parte móvil, las maderas se juntan y el disco se frena. Al frenarse, como el sentido de giro es anti-horario y el freno está instalado a su derecha, la parte móvil se desplaza verticalmente hacia arriba hasta que se iguala la fuerza de frenado, con la del muelle del dinamómetro. Así podemos medir que fuerza está actuando en ese momento sobre el disco.

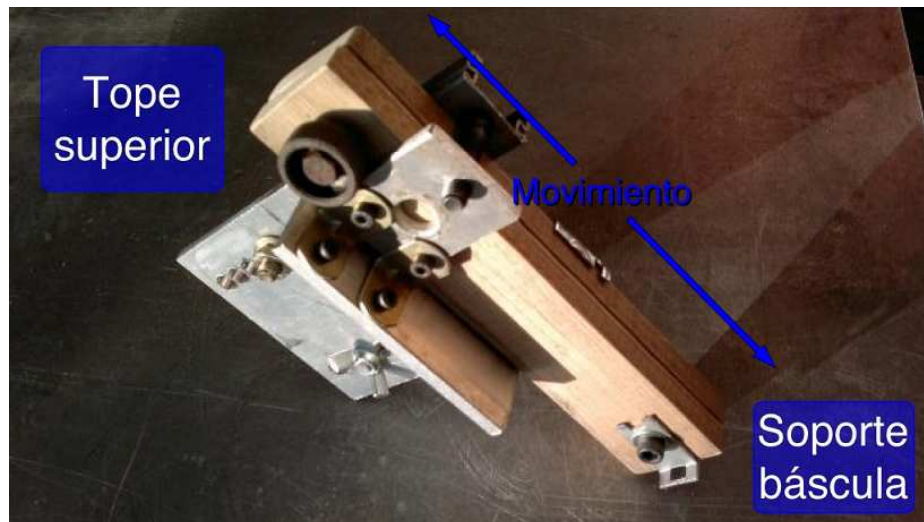


Figura 3.42. Detalle del movimiento de la parte móvil. El disco de freno irá situado dentro de las dos piezas de madera.

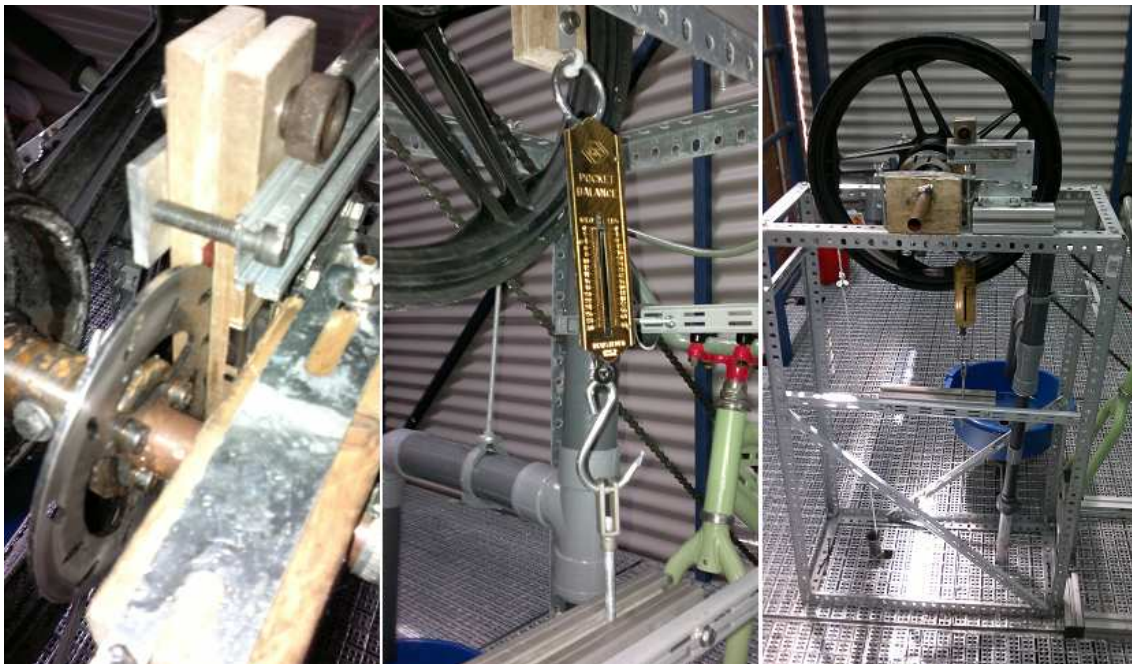


Figura 3.43. Vistas de freno dinamométrico instalado sobre la estructura. Dinamómetro o báscula de medida con tuerca roscada. Acabado final sobre la instalación.

Se ha instalado un dinamómetro o báscula de medida de 30 kilogramos de capacidad. Simplemente tendremos que multiplicar por la fuerza de la gravedad ($9,82\text{m/s}^2$) para saber que fuerza está actuando sobre el disco de freno. Para asegurar que el disco se frena con la misma intensidad en el tiempo, debido al desgaste, conviene sustituir en cada ensayo la lija autoadhesiva que lo frena.

3.3.7.- Presupuesto.

Se va tratar de resumir el presupuesto básico necesario para construir una bici-bomba de mecate. Al coste de este modelo, ha de sumarse también al total, el coste de la instalación original que se recoge en la siguiente tabla.

PARTE	CONCEPTO	PRECIO (€)
Caja guía	Botella	0
	Láminas de PVC	7,75
	Abrazaderas	1,5
Conducto de bajada	Barreño redondo	3,49
	Contador picoflux	17,92
Estructura superior	6 Abrazadera isofónica	1,41
	Broca pala D=22	2,45
	Perfil ranurado 38*38	20
	Rueda	20
	Tubo de Cobre y Accesorios	10
Resto de conductos, elementos de sujeción	Unión tres piezas 50'	2,19
	2 Codo presión 32'	0,75
	2 Manguito presión 32'	0,68
	Manguito unión	0,94
	Tubo PVP 50'	1,8
	Boquilla	4,07
	Tapón presión 40'	0,37
	Tapa reducida doble 32'	0,75
	Codo presión 50'	0,68
	2 Varilla roscada 6	0,82
	Junta plana	0,12
	Manguito presión 32'	0,34
	Terminal rosca macho 32'	0,37
	Junta cónica	0,12
	Abrazadera	2,09
	Tubo PVP Transparente 32' 2,5m	12,23
	Cola de contacto	4,45
	Pegamento PVC	1,13
	Tubos	10
	Tornillos	3,35
TOTAL		131,77

Tabla 3.2. Presupuesto inicial del modelo de TOBELLA.

PARTE	CONCEPTO	COMENTARIOS	UND	PRECIO (€)
Medidor de volumen	Casquillo reductor 40-32mm	Para poder poner la rosca	1	0,25
	Rosca para válvula de 30mm	Para fijar la válvula y el medidor	2	0,67
	Medidor de volumen	1 pulgada, salida pulsada cada 1m ³	1	156,49
	Total	157,41	EUR	
Surtidor 40mm	Hidrotubo 40 mm, Espiroflex	1 metro de hidrotubo	1	2,25
	Codo 90º de 40mm, Adequa	El codo del caño	1	0,26
	Casquillo reducción 40-32mm	Para pasar de 32mm a 40mm	1	0,25
	Manguito HH 32mm	Para conectar quita y pon	1	0,35
	Injerto derivación HH 40mm	Para que salga el agua por el caño	1	0,49
	Collarín cierre incorporado 40mm	Para soportar el surtidor a la base	2	1,02
	Total	4,62	EUR	
Surtidor 50mm	Hidrotubo 50 mm, Espiroflex	1 metro de hidrotubo	1	3,4
	Codo 90º de 50mm, Adequa	El codo del caño	1	0,6
	Casquillo reducción 40-32mm	Para pasar de 32mm a 40mm	1	0,25
	Manguito HH 32mm	Para conectar quita y pon	1	0,25
	Casquillo reducción 50-40mm	Para pasar de 50mm a 40mm	1	0,3
	Injerto derivación HH 40mm	Para que salga el agua por el caño	1	0,98
	Collarín cierre incorporado 40mm	Para soportar el surtidor a la base	2	1,14
	Total	6,92	EUR	
Resto de conductos, elementos de sujeción y medida	Cubo de plástico	Con medidas hasta 12 litros	1	1
	Tapón registro	Para cerrar la válvula de aire	1	0,49
	PVC adhesivo especial BONDO	Cola de contacto	1	4,45
	Tornillos	Tornillos 8mm y mariposas varias	1	1,89
	Disco de freno 12mm	De mini-moto. 3mm de grosor	1	5
	Soporte freno de disco	Mecanizado con torno	1	0
	Papel de lija grano 220	Autoadhesivo	1	2,15
	Dinamómetro	Báscula mecánica 30 Kg	1	17
	Medidor de r.p.m.	LDC, de 1 a 999,9 r.p.m.	1	32,35
	Total	64,33	EUR	
Bicicleta	Bicicleta vieja	En estado de desguace	1	0
	Puños del manillar	Para agarrarse las manos	1	5
	Cadena de bicicleta de montaña	Cadena para pedalear	2	17
	Piñón fijo	Adaptado a la rueda de moto	1	5
	Bote de pintura	Para el cuadro y componentes	1	4,95
	Bote de disolvente	Para la pintura	1	2,5
	Tubo de cobre	22mm de diámetro y 1 metro	1	7,45
	Tiras soporte bicicleta	Aluminio y anclajes	6	32
	Total	34,45	EUR	
TOTAL				307,18

Tabla 3.3. Presupuesto de este proyecto concreto.

4.- RESULTADOS

Para determinar los parámetros de funcionamiento de la bomba de mecate, tenemos que definir en primer lugar, una serie de conceptos previos.

4.1.- Introducción.

En el conjunto de resultados que vamos a obtener posteriormente, vamos a utilizar una serie de variables que detallaremos a continuación, ligadas con los conceptos clave para la mejor comprensión del sistema.

En un primer lugar, nos vamos a centrar en el análisis del comportamiento de cada columna de agua que sube entre los pistones hasta salir por el surtidor.

Si observamos la figura 4.1.A tenemos una representación de una columna de agua encerrada entre un pistón inferior y otro superior. En los primeros instantes de funcionamiento de la bomba, el pistón que sube atrapa una columna de agua incompleta (parte llena de aire H_a), que asciende progresivamente. Esta columna de agua se nombrará como H_{fa} o Altura del Frente de Agua.

4.1.1.- Comportamiento en la tubería.

Al ascender los pistones por la tubería, teniendo en cuenta que el diámetro interior de esta ($\varnothing 27,2\text{mm}$) es superior al diámetro del pistón ($\varnothing 26,5\text{mm}$) para facilitar el movimiento, el pistón superior presenta una pérdida de caudal Q_p hacia su nivel inferior.

Haciendo uso de las ecuaciones termodinámicas, y siendo VC el volumen de control dado, tenemos:

$$\frac{dM_{VC}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad [4.1]$$

Como la densidad del agua permanece constante podemos reducir la expresión como:

$$\frac{dV_{VC}}{dt} = Q_e - Q_p \quad [4.2]$$

Para la columna "i" sería:

$$\frac{dV_i}{dt} = Q_{i-1} - Q_i \quad [4.3]$$

La primera columna, la superior al pistón marcado como "0", columna "0", comienza vacía completamente ($H_{FA}=0$). La siguiente columna, la columna del pistón "1" ya ha atrapado agua ($H_{FA} \neq 0$), de una altura concreta para un instante de tiempo concreto, H_{fa} (altura del frente de agua). Este valor H_{fa} según ascienda la columna por la tubería irá viéndose reducido, puesto que como se indica más arriba, el pistón tiene unas pérdidas de caudal Q_p hacia su nivel inferior.

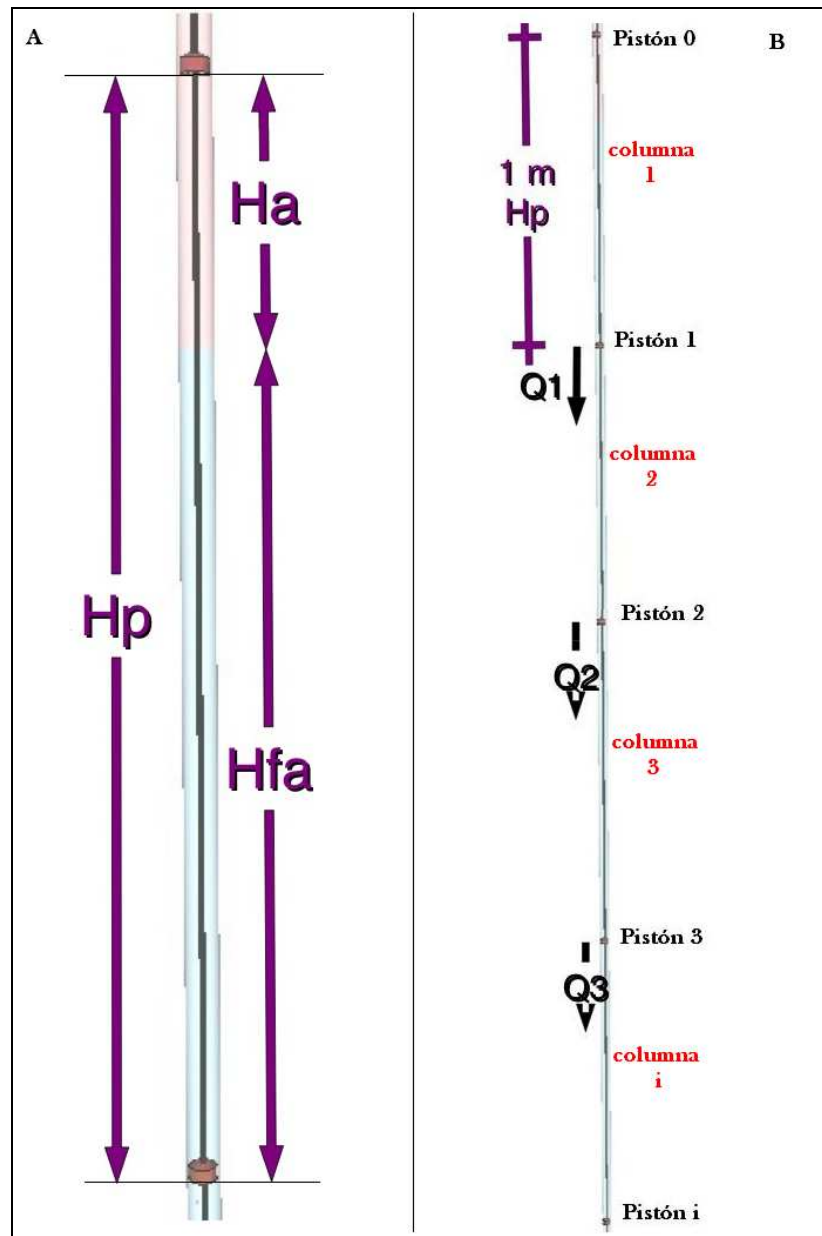


Figura 4.1.A. Columna de agua entre dos pistones. Siendo; H_p : Altura entre pistones; H_{fa} : Altura del frente de agua; H_a : Altura del aire.

Figura 4.2.B. Cadena de pistones. Siendo: Q_1 : Caudal perdidas Columna 1; H_p : Altura entre pistones igual a 1m.

Para $i=1$ ($Q_0=0$), en la columna "1", tenemos:

$$A_{tubería} \cdot \frac{dH_1}{dt} = 0 - Q_1(pistón, H_1) \quad [4.4]$$

Siendo: $A_{tubería}$: El área transversal de la tubería.

$Q_1(Pistón, H_1)$: caudal de perdidas y valores de los que depende (pistón, altura del frente)

Estas pérdidas para la *columna "1"* no se pueden suplir de la columna que tiene por encima, la *columna "0"* porque está completamente llena de aire. Pero vamos a ver que ocurre para el siguiente nivel inferior.

Para $i=2$, en la columna "*2*", tenemos:

$$A_{tuberia} \cdot \frac{dH_2}{dt} = Q_1(pistón, H_1) - Q_2(pistón, H_2) \quad [4.5]$$

La *columna "2"*, al igual que le pasa a la columna "*1*" presenta pérdidas de caudal Q_s hacia su columna inferior. Pero esta a su vez recibe el caudal de pérdidas de la columna "*1*" que si lleva agua. La velocidad de pérdidas del caudal Q_1 (por el pistón 1) es menor que la velocidad de pérdidas del caudal Q_2 (por el pistón 2) porque H_{fa1} es menor que H_{fa2} .

Para $i=n$, en la columna "*i*", tenemos:

$$0(\leftarrow H_n = cte) = Q_{n-1} - Q_n \Rightarrow Q_{n-1} = Q_n \quad [4.6]$$

Así se repite el proceso sucesivamente en la *columna "3"*, la "*4*", hasta alcanzar la columna "*i*" donde prácticamente los caudales de pérdidas se igualan haciendo posible que todas las columnas vayan completas de agua, para un determinado valor de altura entre pistones, tipo de pistón y frecuencia de giro de la rueda.

4.1.2.- Comportamiento en el surtidor.

Lo anterior es válido para el tramo de tubería recta de subida. Pero una vez alcanzamos las proximidades del surtidor, la columna de agua pierde más caudal del que recibe.

Cuando la columna que asciende alcanza la "T" de salida del surtidor, esta no recibe pérdidas de la superior, porque ya ha descargado su contenido y su $H_{FA}=0$. Además esta columna comienza a descargar sobre el surtidor, que a su vez cede sus pérdidas a la columna inmediatamente inferior.

Para obtener una ecuación válida, tendremos que restar al caudal de la tubería, este caudal de pérdidas $Q_{pérdidas}$. De este modo obtenemos el caudal resultante.

$$Q_{resul\ tant\ e} = Q_{tubería} - Q_{pérdidas} \quad [4.7]$$

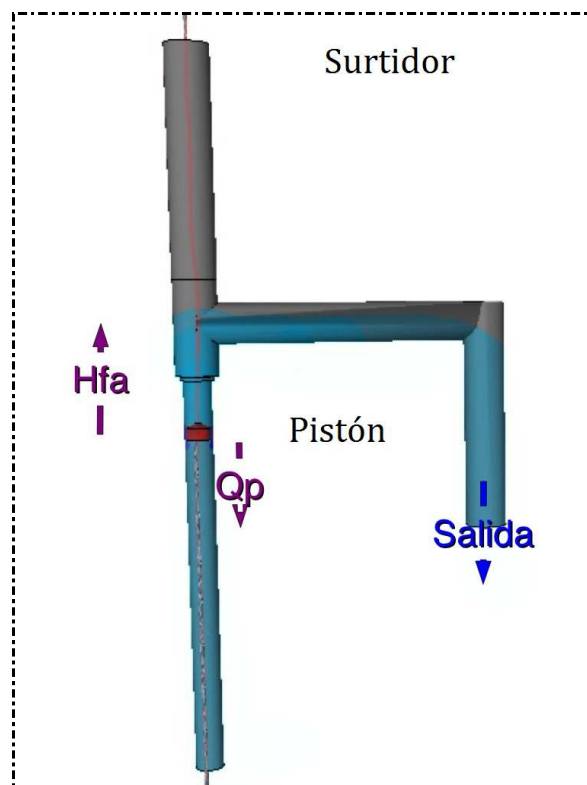


Figura 4.3. Representación del surtidor (Q_p = caudal _{pérdidas}).

Para poder calcular el caudal resultante, debemos considerar cuales son los valores de frecuencia y de altura de frente de agua para obtener un caudal adecuado. Es decir, tendremos que ver para que valor de frecuencia completamos la columna de agua alcanzando el valor máximo de altura de frente de agua.

4.2.- Frecuencia natural de bombeo.

Al tratarse de una bomba de accionamiento manual, el valor de la frecuencia depende de la persona que la acciona. Para una determinada persona, este valor tendera a lo largo del tiempo, ha alcanzar un equilibrio. La frecuencia depende de los siguientes parámetros:

$$f = f(t, R, F) \quad [4.8]$$

Siendo: f: frecuencia natural de giro (Hz).

t: tiempo de bombeo (s).

R: radio de la rueda (m).

F: fuerza aplicada en la rueda necesaria para mover el conjunto (N).

Las dos primeras variables de las que es función la frecuencia, son datos fijos, pero la tercera, la fuerza, a su vez es función de otras dos variables:

$$F = f(H_{FA}, F_R) \quad [4.9]$$

Siendo: F: fuerza (N).

H_{FA} : altura del frente de agua (m).

F_R : fuerza de rozamiento entre los distintos elementos de la bomba (N).

En este caso, la F_R se toma como un dato fijo, puesto que para un mismo tipo de pistones, este valor permanece invariable. Por tanto, la frecuencia natural que deseamos hallar va a ser función únicamente del tiempo que empleamos en bombear y de la H_{FA} .

$$F = f(t, H_{FA}) \quad [4.10]$$

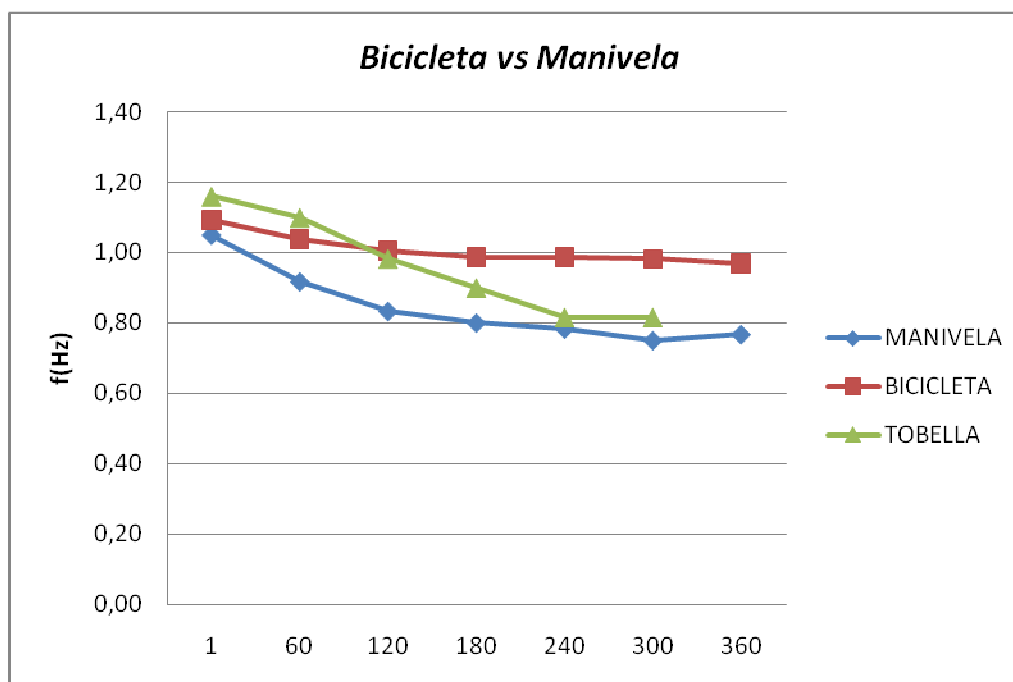
La frecuencia natural lógicamente será distinta si se trata de un varón adulto, una mujer o un niño, es decir depende de la edad de la persona, la sexualidad y la fisonomía. Aunque en un primer momento ejerzamos una gran fuerza al mover la manivela, a medida que va pasando el tiempo, vamos alcanzando un nivel más estable con el que logramos una frecuencia determinada. Este valor será el requerido para la posterior realización de nuestros futuros cálculos.

Se realizan mediciones de un periodo de 6 minutos en el que cada intervalo de 30 segundos se ha tomado el valor de una frecuencia determinada, con la ayuda de un tacómetro electroóptico que emplea los métodos de transmitancia o reflexión. La cabeza sensora, contiene una fuente de luz que permite un haz colimado hacia un área reflectante del objeto y un sensor de luz detecta un pulso de luz cuando el haz es reflejado. Algunos elementos de rotación son propiamente reflexivos y están dispuestos simétricamente (radios de una rueda). Otros objetos requieren que se les acoplen cintas reflexivas, como en nuestro caso, donde hemos pegado en el perfil de la llanta un pequeño trozo de cinta.



Figura 4.4. Fotografía del sensor. Trozo de cinta reflexiva pegado sobre la llanta.

Se han hecho varios ensayos y se ha ponderado un valor medio para obtener la siguiente gráfica. En ella se puede observar existe una tendencia natural de los datos a una línea exponencial. Este ensayo se ha realizado tanto en modo de accionamiento manivela como modo de accionamiento bicicleta.



Gráfica 4.1. Representación de la frecuencia de giro (f) frente al tiempo de bombeo (t). Comparación de ambos tipos de accionamiento de la bomba de mecate a 4,2 metros.

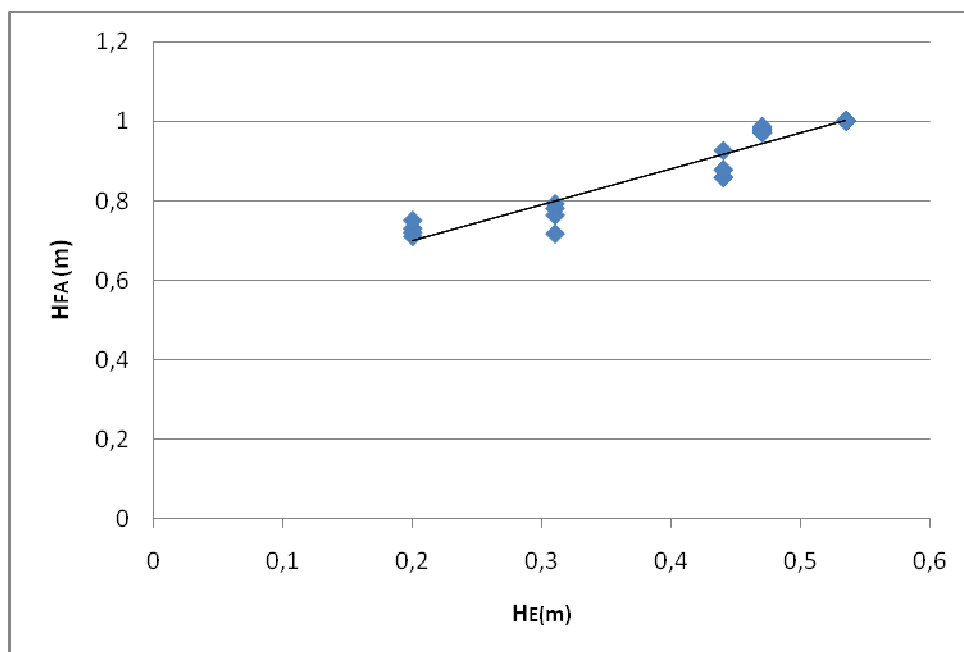
Finalmente, tenemos que a partir de un periodo de tiempo concreto, la frecuencia tiende a un valor de 0,968 Hercios. Este dato es ligeramente superior al obtenido con la manivela de 0,767 Hercios. Así podemos concluir que por medio pedaleo obtenemos mejores resultados de frecuencia natural, valor que repercutirá en el resto de datos que obtengamos, obteniendo un mejor aprovechamiento de la instalación.

4.3.- Altura del frente de agua y nivel de agua útil

Tal y como vimos anteriormente, para una determinada frecuencia y tras un corto periodo de arranque, todas las columnas alcanzan una misma altura de frente de agua, de un valor semejante.

Así, tomaremos este estado de equilibrio para obtener el valor de la H_{FA} . Si ahora comparamos diferentes entradas de frecuencia con la altura del frente de agua que generan estos movimientos, podemos determinar para que valor de frecuencia tenemos una H_{FA} de 1 metro, es decir, tenemos toda la columna completa de agua.

Si variamos la profundidad del depósito y estudiamos como se comporta a determinadas profundidades la altura del frente de agua, vemos que la bomba de mecate es capaz de succionar gran parte de agua. Al nivel de agua útil en el depósito lo denominaremos H_E y los resultados obtenidos haciendo varios ensayos son los representados en la siguiente gráfica.



Gráfica 4.2. Variación de H_{FA} frente a H_E (TOBELLA, 2011).

Para su realización se han tenido en cuenta las condiciones de altura de la instalación de 4,2 metros y 1 metro de distancia entre pistones. Vemos que para el caso de tan solo 0,2 metros de profundidad de agua en el depósito, la bomba es capaz de triplicar esa altura dentro de la columna que sube. Esto es debido a que justo debajo del pistón (que pasa del límite de agua, a la superficie) existe menor presión de la que tiene por encima, succionando gran parte del agua en el movimiento de accesión. Gráficamente la expresión obtenida es la siguiente:

$$H_{FA} = 0,9 \cdot H_E + 0,55 \quad [4.11]$$

Así conseguimos con 0,53 metros de nivel útil de agua, que las columnas vayan completas de agua.

4.4.- Estudio de las Fuerzas Aplicadas

Para calcular la fuerza que debemos aplicar sobre la rueda, es necesario conocer las diferentes componentes de fuerzas que actúan en cada componente. En este apartado lo que se pretende es detallar las distintas fuerzas que actúan, destacando entre ellas las más relevantes y dejando fuera del estudio aquellas que carecen de importancia por su escaso valor.

Para una determinada altura L , tenemos la siguiente representación de fuerzas:

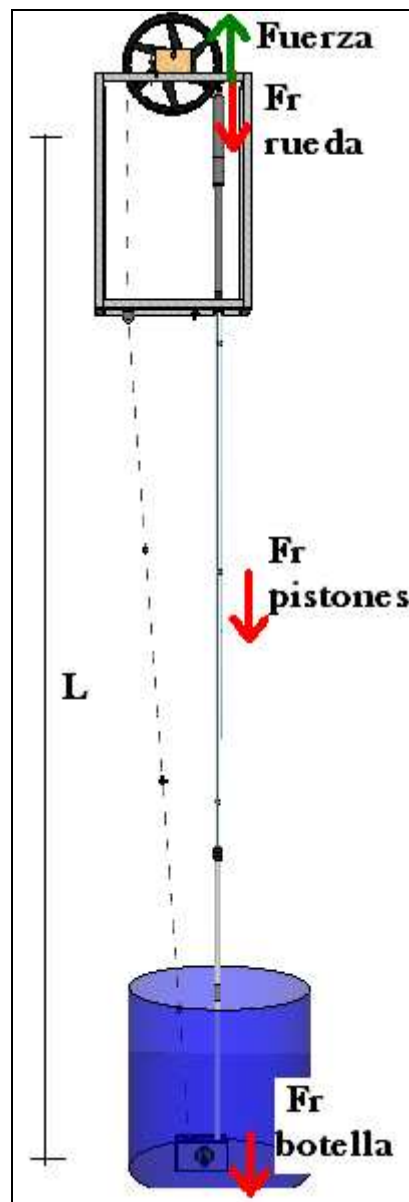


Figura 4.5. Esquema resumen de fuerzas que actúan en la bomba de mecate.

En el esquema se detallan las relevantes, siendo la principal y causante del movimiento la fuerza F . En la rueda tenemos una fuerza de rozamiento o $F_{r \text{ rueda}}$ que resulta del choque de la cuerda con la propia rueda. Los pistones a su ascenso por la tubería rozan levemente contra esta, creando la $F_{r \text{ pistones}}$. Y finalmente, al igual que ocurre con la rueda, en la caja guía, situada en lo más profundo de la instalación existe también una fuerza de rozamiento que ejercen el pistón con la botella guía.

Además de estas fuerzas debemos tener especial consideración con los pesos que actúan. Estos van a ser el peso de la columna de agua que estemos elevando, el peso de los pistones y el peso de la cuerda. El resto serán despreciables. Si traducimos lo anteriormente visto a formulación, podemos deducir las siguientes expresiones.

$$F = P_{\text{cuerda}} + P_{\text{pistones}} + P_{\text{agua}} + Fr_{\text{cuerda-rueda}} + Fr_{\text{pistones-tubería}} + Fr_{\text{cuerda-botella}} \quad [4.12]$$

Siendo: P_{cuerda} : peso efectivo de la cuerda.

P_{pistones} : peso efectivo de los pistones.

P_{agua} : peso de la columna de agua.

$Fr_{\text{cuerda-rueda}}$: fuerza de rozamiento entre la cuerda y la rueda.

$Fr_{\text{pistones-tubería}}$: fuerza de rozamiento entre los pistones y la tubería.

$Fr_{\text{cuerda-botella}}$: fuerza de rozamiento entre la cuerda y la botella.

$$F = (m_{cs} \cdot g - m_{cb} \cdot g) + (m_{ps} \cdot g - m_{pb} \cdot g) + m_{H2O} \cdot g + \mu_{c-r} \cdot N_{c-r} + \mu_{p-t} \cdot N_{p-t} + \mu_{c-b} \cdot N_{c-b} \quad [4.13]$$

Siendo: m_{cs} : masa de la cuerda que sube.

m_{cb} : masa de la cuerda que baja.

m_{ps} : masa de los pistones que suben.

m_{pb} : masa de los pistones que bajan.

μ_{c-r} : coeficiente de rozamiento entre la cuerda y la rueda.

N_{c-r} : fuerza normal entre la cuerda y la rueda.

μ_{p-t} : coeficiente de rozamiento entre el pistón y la tubería.

N_{p-t} : fuerza normal entre el pistón y la tubería.

μ_{c-b} : coeficiente de rozamiento entre la cuerda y la botella.

N_{c-b} : fuerza normal entre la cuerda y la botella.

Podemos hacer las siguientes simplificaciones. La masa de la cuerda que sube es igual a la masa de la cuerda que baja, anulándose mutuamente. Esta eliminación ocurre igual con la masa de los pistones.

Parece lógico afirmar que tanto la $Fr_{\text{cuerda-botella}}$ (fuerza de rozamiento entre la cuerda-botella), como la $Fr_{\text{cuerda-rueda}}$ (fuerza de rozamiento entre la cuerda-rueda) son valores constantes inalterables con la variación de altura de la instalación. Sin embargo, para el caso de $Fr_{\text{pistones-tubería}}$ este dato varía debido a que a mayor altura de bombeo (mayor profundidad del pozo), el número de pistones aumenta y por tanto el valor de esta fuerza de rozamiento también aumenta. Si consideramos que esta fuerza de rozamiento (que varía linealmente), es mucho menor que la suma de las dos anteriores, y por consiguiente que son las otras las más notorias (y constantes), podemos considerar que el total de las fuerzas de rozamiento también constante.

$$Fr_{TOTAL}(cte) \Leftarrow Fr_{\text{pistones-tubería}} \lll Fr_{\text{cuerda-rueda}} + Fr_{\text{cuerda-botella}} \quad [4.14]$$

Cabe mencionar que se ha considerado justo el instante de tiempo donde los pistones están tanto en el tramo de subida (dentro de la tubería), como en el tramo de bajada. Así no se ha introducido en este estudio los instantes donde pudieran ocasionar los pistones fuerzas de rozamiento con la rueda o con la botella de la caja guía. De esta manera, en el tramo de subida de agua, podremos considerar que coincide el máximo número de pistones subiendo, dato a tener en cuenta a la hora de calcular el valor del volumen de los pistones que se multiplica por el número de pistones encerrados en el tubo.

La Fr total, se ha calculado de manera experimental, haciendo el siguiente experimento. Sobre la manivela en posición horizontal se ha colocado un cubo con una báscula digital. Se ha ido introduciendo peso dentro del cubo hasta el instante en el que la masa vence el movimiento de la rueda. Este dato de masa (y por tanto de fuerza) da el valor de la fuerza de rozamiento estático total, asimilando este mismo valor al valor de la fuerza de rozamiento dinámico. $Fr_{TOTAL} = 9,1 \cdot 9,82 = 8,93N$. Este dato es mayor que el obtenido por TOBELL de 7,6N en parte debido al rozamiento del conjunto cadena, piñones que incrementan este dato.



Figura 4.6. Ensayo para obtener la fuerza de rozamiento.

4.4.1.- Masa de agua.

Podemos hallar de forma sencilla el volumen del agua encerrada en la tubería. Para ello al volumen total debemos restarle tanto el volumen de la cuerda, como el volumen de los pistones que estén dentro de la tubería. Para el caso de la altura de nuestra instalación donde tenemos 4,2 metros de tubería, en valor máximo de pistones, si estos están separados a la distancia de 1 metro entre sí, será de 4 unidades.

Volumen de la tubería.

$$V_{tubería} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h = \pi \cdot \frac{0,0272^2}{4} \cdot 4,2 = 2,44 \cdot 10^{-3} [m^3] \quad [4.15]$$

Volumen del pistón.

Como su geometría es similar a la de un cilindro y un cono juntos, haremos:

$$V_{pistón} = V_{cilindro} + V_{cono} \quad [4.16]$$

$$V_{cilindro} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h = \pi \cdot \frac{0,0265^2}{4} \cdot 0,005 = 2,757 \cdot 10^{-6} [m^3] \quad [4.17]$$

$$V_{cono} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot h}{3} = \frac{\pi \cdot 0,01325^2 \cdot 0,0065}{3} = 1,195 \cdot 10^{-6} [m^3] \quad [4.18]$$

$$V_{pistón} = V_{cilindro} + V_{cono} = 3,952 \cdot 10^{-6} [m^3]$$

$$4 \cdot V_{pistón} = 1,581 \cdot 10^{-5} [m^3]$$

Volumen de la cuerda.

$$V_{cuerda} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h = \pi \cdot \frac{0,004^2}{4} \cdot 4,2 = 5,277 \cdot 10^{-5} [m^3] \quad [4.19]$$

Volumen de agua.

$$V_{agua} = V_{tubería} - 4 \cdot V_{pistón} - V_{cuerda} = 2,372 \cdot 10^{-3} [m^3] = 2,372 [litros] \quad [4.20]$$

A una temperatura ambiente de 15°C tenemos una densidad de agua igual a 999,19 (kg/m³). Por tanto obtenemos una masa de agua de:

$$m_{H_2O} = 2,369 [Kg]$$

4.4.2.- Fuerza resultante.

De este modo podemos concluir que la fuerza resultante o la fuerza aplicada es la siguiente:

$$F = m_{H_2O} \cdot g + Fr_{TOTAL} \quad [4.21]$$

$$F = 2,396[kg] \cdot 9,82[m/s^2] + 8,93[N] = 32,46[N]$$

4.5.- Par sobre la rueda.

Para ello consideramos el diámetro de la rueda, el espesor de la goma que hace de fricción con la cuerda y los pistones y el radio de la cuerda, todo como un conjunto:

$$R = R_{rueda} + Espesor_{goma} + R_{cuerda} = 194,5 + 1,5 + 2 = 198[mm] = 0,198[m] \quad [4.22]$$

Haciendo uso de la expresión de par, vamos a calcularlo sobre la rueda de la manera siguiente:

$$M = F \cdot R \quad [4.23]$$

Siendo: M: Par que se ejerce en la rueda.

F: Fuerza que se ejerce en la cuerda.

R: Radio total de la rueda.

$$M = 32,46[N] \cdot 0,198[m] = 6,43[N \cdot m]$$

4.6.- Potencia.

Para hallar la potencia es necesario obtener primero la velocidad de giro de la rueda. Para ello vamos a utilizar la frecuencia natural que hemos obtenido anteriormente. Este valor era de $f=0,968\text{Hz}$. Así tenemos lo siguiente:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{natural} = 6,08[rad/s] \quad [4.24]$$

Siendo: ω : velocidad de giro de la rueda.

$f_{natural}$: la frecuencia natural.

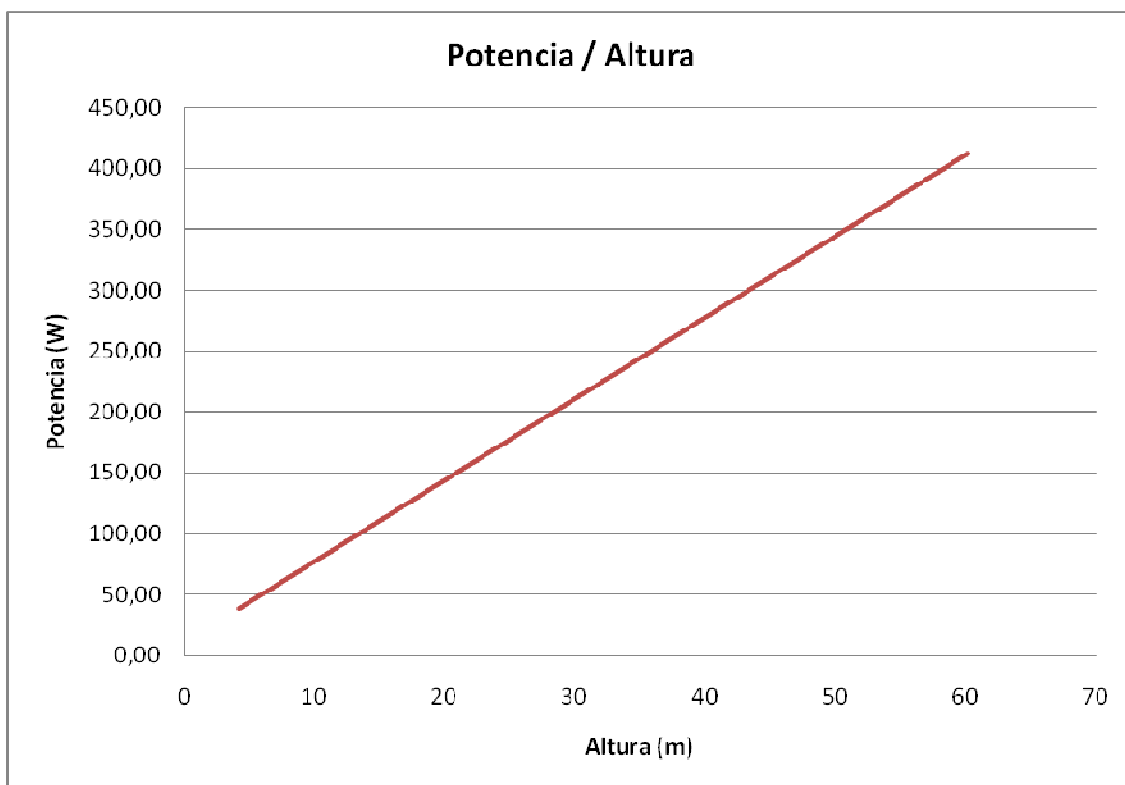
Finalmente obtenemos la potencia como el producto del par por la velocidad de giro.

$$P = M \cdot \omega = 39,07[W] \quad [4.25]$$

(*) Si comparamos estos tres datos obtenidos con los de TOBELL, los suyos son inferiores debido a una F_R menor y a que la frecuencia natural de ahora es mayor. Sus datos son: $F=30,6[N]$; $M=6,05[NM]$ y $P=30,4[W]$.

4.7.- Potencia frente a Altura.

Si calculamos con la ayuda de una tabla de Excel, las múltiples posibilidades de fuerza, par y potencia dependiendo de la altura de trabajo y por consiguiente del número de pistones que ascienden atrapando columnas de agua, obtenemos una grafica como la mostrada a continuación. Para su obtención se ha considerado que la F_r permanece constante.



Gráfica 4.3. Gráfica Potencia/Altura para una tubería normalizada de 32mm de PVC.

Podemos ver que la tendencia es a aumentar de forma lineal la potencia, cuanto mayor es la altura de bombeo. Para nuestra configuración de tubería, si quisiéramos extraer agua a 20 metros de profundidad, necesitaríamos desarrollar una potencia de 145,37W.

Si queremos operar la instalación por medio de la manivela (con los brazos) y hacemos caso de las recomendaciones de potencia desarrollable de referencia en el empleo de bombas manuales en países del tercer mundo (TOMILLO 2005), tenemos:

- Para un hombre que desarrolla 70W con los brazos, la altura útil de la instalación con tubería de 32mm es 9,2m.
- Si por el contrario el hombre utiliza las piernas, desarrolla una potencia de 100W, con lo que consigue aumentar la altura de la instalación a 14,2m.
- Para una altura idealizada a 60 metros es necesario aplicar una potencia de 412,33W, valor muy difícil de alcanzar. Por esta razón se recomienda reducir la sección de la tubería a medida que aumentamos la profundidad.

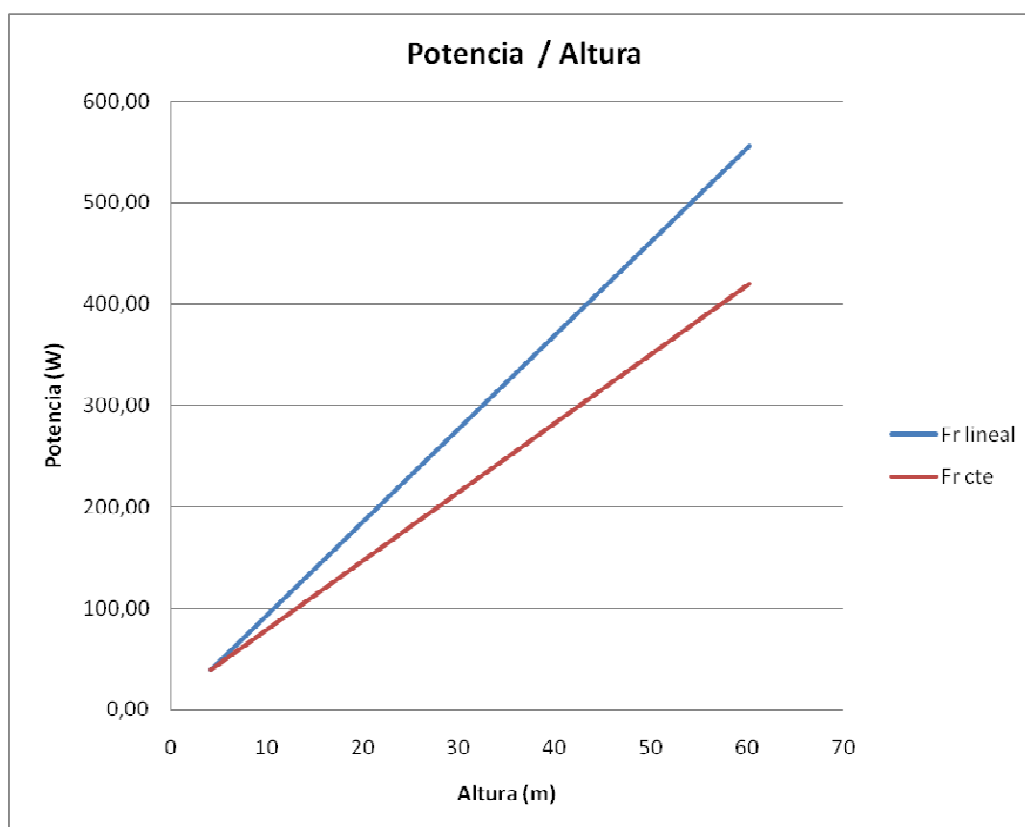
4.7.1.- Fuerza de rozamiento lineal.

Ahora consideramos que el valor de la fuerza de rozamiento entre el pistón y la tubería (de comportamiento lineal), es un valor mucho mayor que la suma de las otras dos fuerzas de rozamiento (ver [4.14]). Así el sumatorio de rozamientos ($Fr = Fr_{p-t} + Fr_{c-r} + Fr_{c-b}$) no se comporta de forma constante, sino que tiende linealmente a aumentar cuanto mayor es la altura, de este modo tenemos la siguiente afirmación:

$$Fr_{TOTAL}(lineal) \Leftarrow Fr_{pistones-tubería} \gg Fr_{cuerda-rueda} + Fr_{cuerda-botella} \quad [4.26]$$

Esto viene a decir que frente a un incremento en la altura, la fuerza de rozamiento aumenta linealmente (aumentando consecuentemente el par y la potencia aplicables), pues consideramos que este valor no es tan pequeño y despreciable como antes, donde dábamos más importancia a la suma de las otras dos fuerzas de rozamiento.

Vamos a comparar gráficamente ambos casos en la siguiente gráfica:



Gráfica 4.4. Gráfica potencia frente altura para los supuestos de Fr cte. y Fr lineal frente a los diversos valores de altura o profundidad del pozo.

- Ahora para un hombre que desarrolla 70W con los brazos, la altura útil de la instalación con tubería de 32mm es 8,2m, menor que el anterior caso.
- Si por el contrario el hombre utiliza las piernas, desarrolla una potencia de 100W, con lo que consigue aumentar la altura de la instalación a 11,2m.

4.8.- Fuerza aplicada en columnas parcialmente ocupadas.

En los cálculos introducidos anteriormente, hemos considerado en todo momento que para la frecuencia natural obtenida, las columnas van completas de agua. Este hecho se demuestra visualmente al observar a través de la tubería de PVC transparente, como van completas las columnas entre pistón y pistón. Ahora vamos a estudiar que fuerza vamos a obtener si dentro de cada columna hay una parte de aire encerrada. Para ello se ha introducido un factor Φ que se multiplica en la ecuación de fuerza, que lo expresamos de la siguiente manera:

$$F = m_{H_2O} \cdot g + Fr_{TOTAL}$$

$$F = \rho \cdot A \cdot \phi \cdot h \cdot g + Fr_{TOTAL} \quad [4.27]$$

Siendo: ρ : la densidad del agua a 15°C.

A: el área de la tubería.

Φ : el factor de llenado.

h: la altura de bombeo.

g: la fuerza de la gravedad.

De este modo hemos llamado Φ a la siguiente igualdad:

$$\phi = \frac{V_{ocupado}}{V_{Total}} = \frac{V_{agua}}{V_{agua} + V_{pistón} + V_{cuerda}} \quad [4.26]$$

Siendo: $V_{ocupado}$: el volumen ocupado de agua.

V_{total} : el volumen total de la tubería.

Para una frecuencia de 0,4Hz TOBELLA comprobó experimentalmente que tenemos una altura de frente de agua constante en el tiempo de valor 0,6metros. En realidad esta afirmación no es cierta, si bien el parámetro que limita la ocupación parcial o total de las columnas, es la altura útil de agua o H_E tal y como se vio en la gráfica 4.2.

Bastará con calcular el volumen de aire que queda encerrado en cada columna y multiplicarlo por el número de columnas que hay en la subida. Para nuestra altura de 4,2 metros hay 4 columnas que aportan aire, porque el 0,2 metros que resta lo hemos supuesto en el nivel superior y por tanto va relleno de agua. Este nuevo volumen de aire calculado, se restara a la ecuación final de volumen, hallándose así el volumen ocupado.

Volumen de aire.

$$V_{aire} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h_{aire} = \pi \cdot \frac{0,0272^2}{4} \cdot ((1-0,6) \cdot 4) = 9,297 \cdot 10^{-4} [m^3] \quad [4.28]$$

Volumen ocupado.

$$V_{ocupado} = V_{tubería} - 4 \cdot V_{pistón} - V_{cuerda} - V_{aire} = 1,443 \cdot 10^{-3} [m^3] = 1,443 [litros] \quad [4.29]$$

A una temperatura ambiente de 15°C tenemos una densidad de agua igual a 999,19 (kg/m³). Por tanto obtenemos una masa de agua de:

$$m_{H_2O} = 1,441 [Kg]$$

Si llamamos al V_{TOTAL} el valor de $V_{tubería}$, ya podemos resolver la ecuación de fuerza, obteniendo primero el siguiente valor de factor de llenado:

$$\phi = \frac{V_{ocupado}}{V_{Total}} = \frac{1,443 \cdot 10^{-3}}{2,44 \cdot 10^{-3}} = 0,59$$

$$F = 8,93 [N] + 999,19 \cdot \pi \cdot \frac{0,0272^2}{4} \cdot 4,2 \cdot 0,59 \cdot 9,82$$

$$F = 23,06 [N]$$

Con este nuevo dato de fuerza obtenemos los siguientes valores de Par y de Potencia:

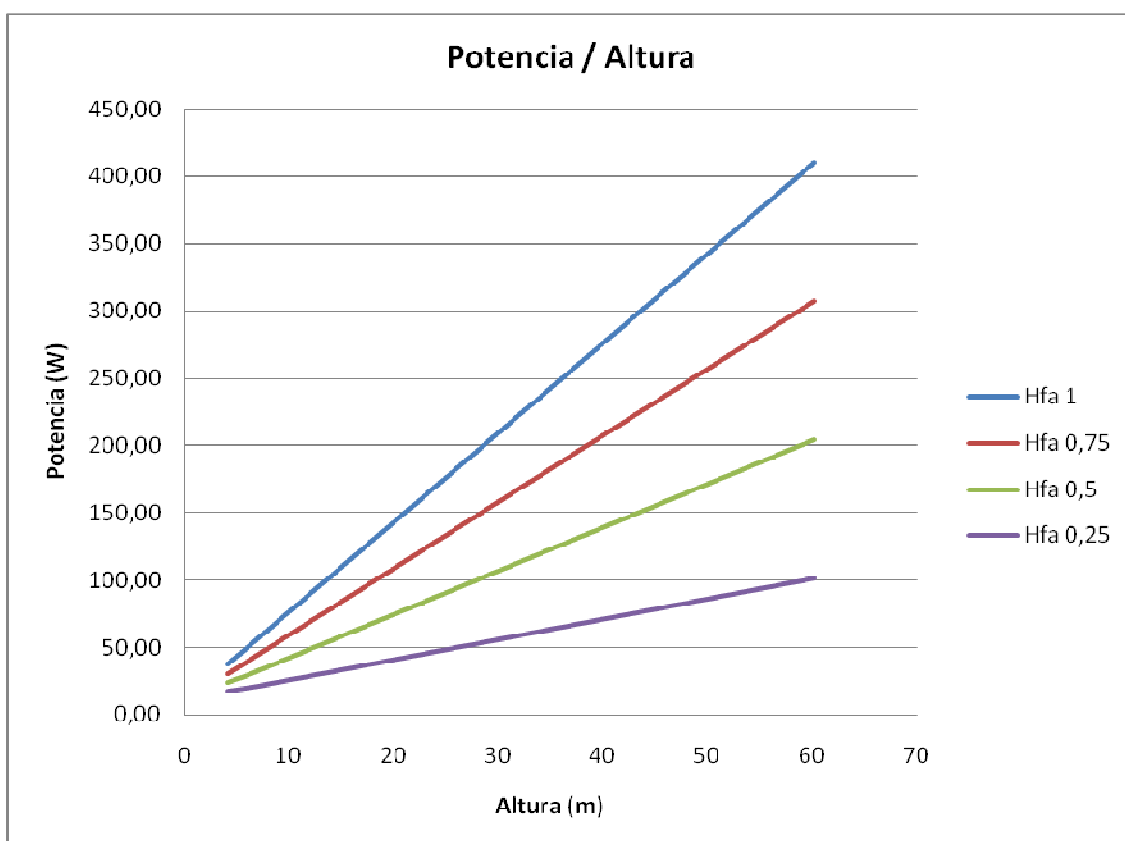
$$M = F \cdot R = 23,06 \cdot 0,198 = 4,56 [N \cdot m]$$

$$P = M \cdot \omega = 4,56 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,4) = 11,46 [W]$$

Así hemos comprobado como al reducir la altura útil del depósito, y por consiguiente disminuir el porcentaje de agua en cada columna frente al de aire, la fuerza que necesitamos ejercer disminuye considerablemente. Si quisiéramos obtener el máximo caudal al máximo rendimiento posible, tendríamos que hacer un esfuerzo muy grande. Este dato es muy útil porque amplía las posibilidades de utilización de la bomba de mecate a diferentes profundidades.

4.9.- Potencia frente a la Altura a distintos intervalos de ocupación.

Mediante una gráfica se va a resumir el conjunto de datos de potencia frente altura que se han obtenido a medida que vamos variando los parámetros de revoluciones por minuto con las que giramos la rueda. A partir de un determinado valor, esta velocidad influye directamente en la ocupación total o parcial de cada columna de agua que elevamos. Si comparamos varios casos según la relación de altura del frente del agua frente a la altura del aire encerrada, tenemos la siguiente gráfica:



Gráfica 4.5. Gráfica de Potencia frente a Altura del pozo. Se comparan cuatro valores de altura de frente de agua. De 1 metro, igual a la distancia entre pistones, hasta 0,25 metros. Se ha considerado que la fuerza de rozamiento permanece constante frente a la altura.

Con esta gráfica podemos deducir el siguiente ejemplo. Si tenemos un pozo de 60 metros de altura y deseamos extraer agua mediante una bomba de mecate, podemos hacerlo cómodamente con solo 101,74 W de potencia a una altura útil adecuada. Lógicamente el caudal que obtendremos será menor que si bombeásemos a la frecuencia natural y altura útil mayor de 0,53m, pero en este caso deberíamos emplear una potencia de 410W que difícilmente podríamos alcanzar. Estos valores se han obtenido para una tubería de 32mm de diámetro exterior ($\Phi 27,2$ mm interior). Estos 101,74W de potencia los podríamos conseguir cómodamente con la ayuda de una bicicleta, mejor que si empleamos el uso de la manivela.

4.10.- Relaciones de Par y Potencia en los dos ejes.

Parece interesante calcular las diversas relaciones que han ido apareciendo, a la hora de introducir la bicicleta en la bomba de mecate. Vamos a necesitar la ayuda de un pequeño dibujo donde denominaremos los diferentes elementos del conjunto y sus relaciones de fuerza, par y potencia.

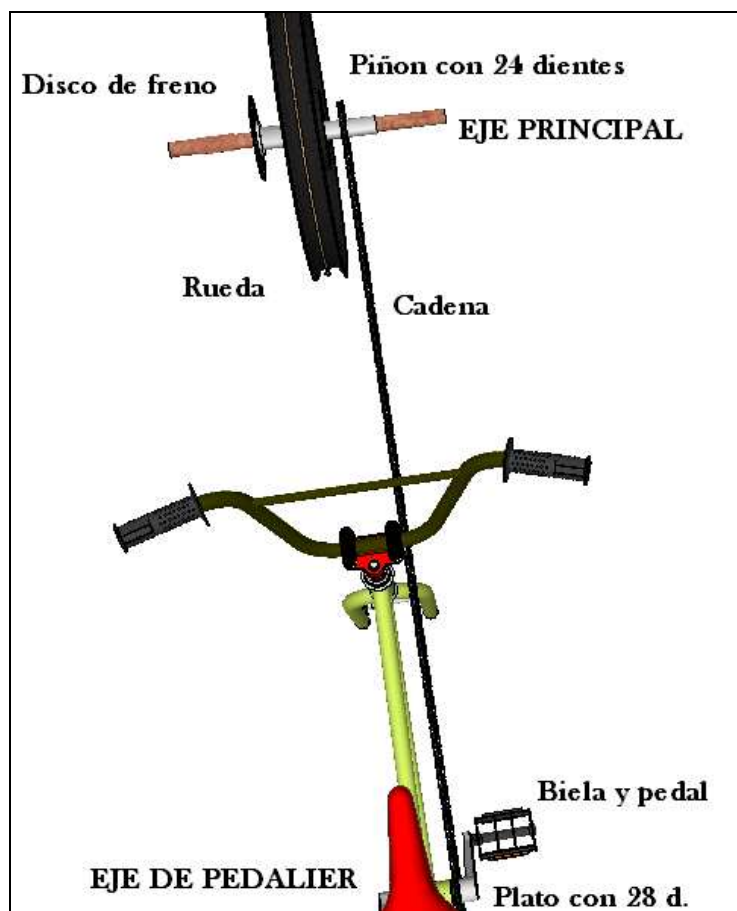


Figura 4.7. Dibujo esquemático de los ejes y elementos que forman parte de la transmisión de movimiento del sistema, desde los pedales hasta la rueda de la bomba.

En un primer momento cabe destacar que existen dos ejes claramente diferenciados. Uno es el eje principal en el cual se encuentran rueda, piñón de 24 dientes y disco de frenado. Este eje irá asentado a la estructura por medio de los cojinetes fabricados de madera que no se han incluido en la figura. Y un segundo eje, en este caso interno en el cuadro de la bicicleta, o eje de pedalier donde van fijados los pedales por medio de dos bielas de 0,175 metros cada una. En este eje hay un plato de 28 dientes.

Ambos ejes van unidos por medio de la cadena. De este modo, tanto el plato de la bicicleta como el piñón de la bomba giran mutuamente sin deslizarse, recorriendo el mismo espacio. Como el número de piñones es diferente, la relación de transmisión también lo es. Al cambiar ésta, se cambia el par de fuerza aplicada en cada eje, por lo que se debe realizar un análisis.

Los datos en la rueda ya los teníamos calculados con las expresiones [4.21], [4.23] y [4.24]. Hemos considerado que la rueda gira a la frecuencia natural 0,968 Hz ó 58,08 r.p.m. Recopilando los datos teníamos:

$$\begin{aligned}F_{\text{rueda}} &= 32,46[N] \\M &= F \cdot R = 32,46 \cdot 0,198 = 6,43[N \cdot m] \\P &= M \cdot \omega = 6,43 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,968 = 39,07[W]\end{aligned}$$

Fuerza (F), Par (M) y Potencia (P) en la rueda, respectivamente. Como el par es el mismo en cualquier parte de ese eje, sin mayor relación que el radio donde queramos medir la fuerza:

$$\begin{aligned}F_{\text{EJE-PRINCIPAL}} &= M / R_{\text{eje}} = 6,43 / 0,022 = 292,27[N] \\F_{\text{DiscoFrenado}} &= M / R_{\text{disco}} = 6,43 / 0,11 = 58,45[N]\end{aligned} \quad [4.30]$$

Hemos considerado el diámetro exterior del eje principal de 2,2cm. Sobre el disco de freno de 12cm de diámetro, las pastillas trabajan a 1cm del borde del disco. Esta fuerza sobre el disco es importante calcularla puesto que será nuestro hándicap a la hora de elegir un dinamómetro con el que medir sobre el disco.

Si relacionamos el número de dientes con el número de revoluciones, tendremos que:

$$Z_1 \cdot n_1 = Z_2 \cdot n_2 \quad [4.31]$$

Siendo: Z_1 : el número de dientes del piñón del eje principal.

n_1 : el número de revoluciones por minuto del eje principal.

Z_2 : el número de dientes del plato de la bicicleta.

n_2 : el número de revoluciones por minuto del eje de pedalier.

Sustituyendo los valores y despejando n_2 , tenemos:

$$n_2 = \frac{Z_1 \cdot n_1}{Z_2} = \frac{24 \cdot 58,08}{28} = 49,78[r.p.m.]$$

Si relacionamos el diámetro del piñón y del plato con la velocidad de rotación, también podemos hallar la velocidad en el eje de pedalier de la siguiente manera:

$$d_1 \cdot \omega_1 = d_2 \cdot \omega_2 \quad [4.32]$$

Siendo: d_1 : el diámetro del piñón del eje principal.

ω_1 : la velocidad de rotación del piñón.

d_2 : el diámetro del plato de la bicicleta.

ω_2 : la velocidad de rotación del plato.

Sustituyendo los valores conocidos y despejando w_2 , tenemos:

$$w_2 = \frac{d_1 \cdot w_1}{d_2} = \frac{0,085 \cdot 58,08}{0,10} = 49,36[r.p.m.]$$

Como podemos ver es un valor muy similar al anteriormente calculado, dando por válida nuestra expresión. Cualquiera de las dos expresiones es válida. Es ahora cuando podemos calcular los datos de par y fuerza sobre la bicicleta haciendo uso de la hipótesis de que la potencia en el eje principal es la misma que la potencia sobre el eje de pedalier.

Par en la bicicleta.

Como hemos mencionado anteriormente es distinto al par aplicado sobre el eje de la bomba, por ello lo calcularemos nuevamente.

$$P_{bomba} = P_{bicicleta} \Rightarrow M_{bicicleta} = \frac{P_{bomba}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad [4.33]$$

$$M_{bicicleta} = \frac{39,07}{2 \cdot \pi \cdot \frac{49,36}{60}} = 7,56[N \cdot m]$$

Fuerza sobre el plato.

Será la fuerza que se aplica sobre el plato de la bicicleta.

$$F_{plato} = M_{bicicleta} / R_{plato} = 7,56 / 0,10 = 75,6[N] \quad [4.34]$$

Fuerza sobre los pedales.

Será la fuerza que ejercemos directamente sobre los pedales.

$$F_{pedales} = M_{bicicleta} / R_{biela} = 7,56 / 0,175 = 43,19[N] \quad [4.35]$$

Para estos cálculos se ha considerado que no hay fuerzas de rozamiento apreciables entre la cadena y los dientes del piñón y del plato. Tampoco hay disipación de calor en los engranajes.

4.11.- Esfuerzo desarrollable por los usuarios.

Según el Plan de Naciones Unidas son necesarios 20litros/persona día. Por otro lado la Organización Mundial de la Salud sitúa esta cifra en los 50litros/persona día. Como conocemos la siguiente expresión:

$$\dot{W}_{persona} = \frac{\dot{W}_{util}}{\eta_{bomba}} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q}{\eta_{bomba}} \quad [4.36]$$

Siendo: $\dot{W}_{persona}$: esfuerzo desarrollable por los usuarios.

η_{bomba} : el rendimiento de la bomba.

h: altura de la instalación, es un dato local.

ρ : la densidad del agua.

g: la gravedad 9,81m/s.

Q: el caudal.

De la ecuación anterior, podemos sustituir el caudal como $Q=V/t$ donde obtenemos la siguiente expresión:

$$t_{persona} \cdot \dot{W}_{persona} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot V_{agua}}{\eta_{bomba}} \quad [4.37]$$

Siendo: $T_{persona}$: el tiempo empleado en la extracción de agua.

$V_{agua\ necesaria}$: cantidad de agua necesaria para ese momento.

Si ahora hacemos ensayos con el nuevo contador volumétrico, podemos relacionar los nuevos datos que obtengamos con los anteriormente calculados de potencia a régimen constante. Se ha realizado mediciones similares como cuando se pretendió hallar la frecuencia natural. Se han hecho varios ensayos de volumen a un minuto de accionamiento de la bomba, incrementando minuto a minuto hasta un tiempo total de 6 minutos, y se han tomado las medidas de volumen. De esta manera, con la expresión de más arriba y tomando el dato de 39,07 W de potencia (columnas completas a 4,2 metros de altura), y la cifra de 50 litros que dicta la OMS (ver tabla siguiente apartado), hemos conseguido hallar el rendimiento de nuestra instalación que se estima en un 89%.

$$\eta_{bomba} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot V_{agua}}{t_{persona} \cdot \dot{W}_{persona}} = \frac{999,19 \cdot 9,82 \cdot 4,2 \cdot 0,05}{62 \cdot 39,07} = 0,85\%$$

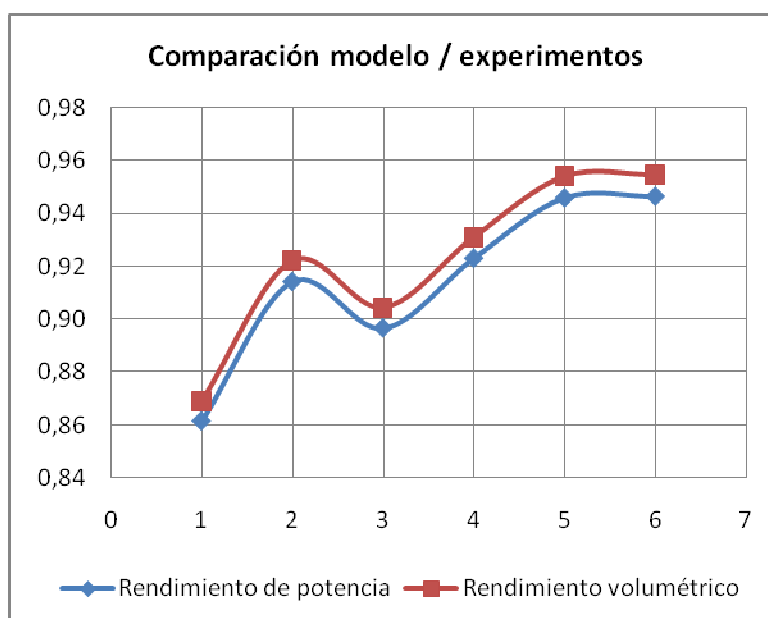
4.12.- Comparaciones entre modelo y experimentos.

Si ahora lo que pretendemos es verificar que hemos obtenido unos resultados teóricos próximos a los términos experimentales, podemos usar la siguiente tabla. Para su elaboración se han tenido en cuenta los datos de: altura de la instalación 4,2 metros; densidad de agua a 15°C igual a 999,19 kg/m³ y operando la bomba con la ayuda de la bicicleta a frecuencia nominal 0,968 Hz. Los datos de volumen se obtuvieron con el contador volumétrico de 1 pulgada. Sus cálculos y medidas se resumen a continuación:

Minuto	Volumen (litros)	Q_{medio} (l/s)	Q_i (l/s)	η_w	η_v	Tiempo (s)	W_{persona} (W)
1	49	0,82	0,93	0,86	0,88	60	39,07
2	104	0,87	0,93	0,91	0,93	120	39,07
3	153	0,85	0,93	0,90	0,91	180	39,07
4	210	0,88	0,93	0,92	0,94	240	39,07
5	269	0,90	0,93	0,95	0,96	300	39,07
6	323	0,90	0,93	0,95	0,96	360	39,07
0,51	25	0,81	0,93	0,85	0,87	31	39,07
1,02	50	0,81	0,93	0,85	0,87	62	39,07

Tabla 4.1. Tabla resumen de medidas de volumen de agua obtenidas en el laboratorio. En ella se han representado los valores típicos según B.M. de 25 y 50 l/diarios.

En la siguiente gráfica podemos ver como hay una variación entre el rendimiento volumétrico y el rendimiento de potencia. Esto es debido a que la fuerza de rozamiento introducida en los cálculos es menor de la que realmente esta actuando, obteniendo de esta manera un caudal ligeramente menor al estimado inicialmente. Existe un error de medida.



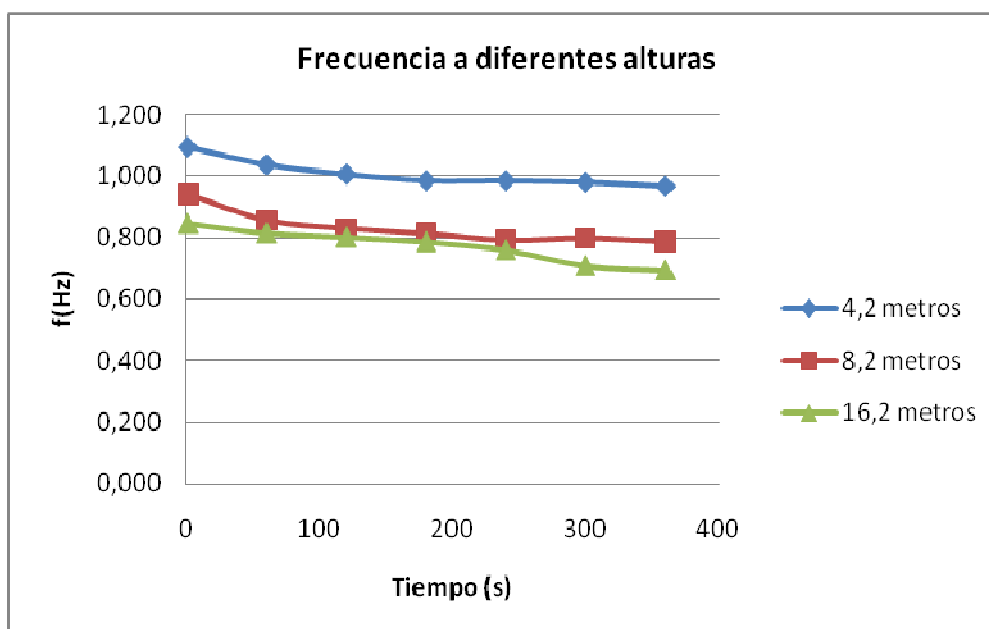
Gráfica 4.6. Comparación del rendimiento de potencia frente al rendimiento volumétrico.

4.13.- Medidas con el dinamómetro.

Si empleamos el dinamómetro instalado para caracterizar la instalación a diferentes alturas de funcionamiento, podremos obtener las siguientes expresiones gráficas. Para su realización se han empleado datos de volumen recogidos experimentalmente.

4.13.1.- Frecuencia natural a diferentes alturas.

Al igual que hicimos en la altura real de la instalación, vamos a medir como influye el aumento de trabajo que tenemos que realizar en nuestra frecuencia natural de pedaleo. Se han tomado medidas en intervalos de 60 segundos con la ayuda del medidor de vueltas digital. La gráfica obtenida es la siguiente, para el caso real de 4,2 metros y los hipotéticos supuestos de 8,2 metros y 16,2 metros.

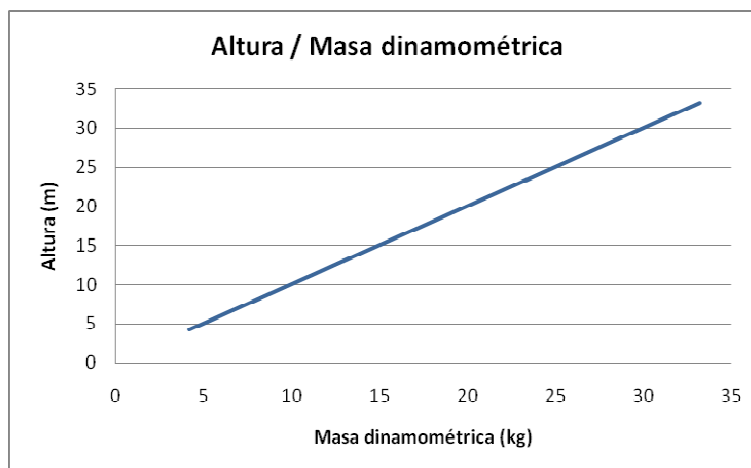


Gráfica 4.7. Variación de la frecuencia natural a diferentes alturas.

La tendencia es a disminuir la frecuencia cuanto mayor es la altura de bombeo.

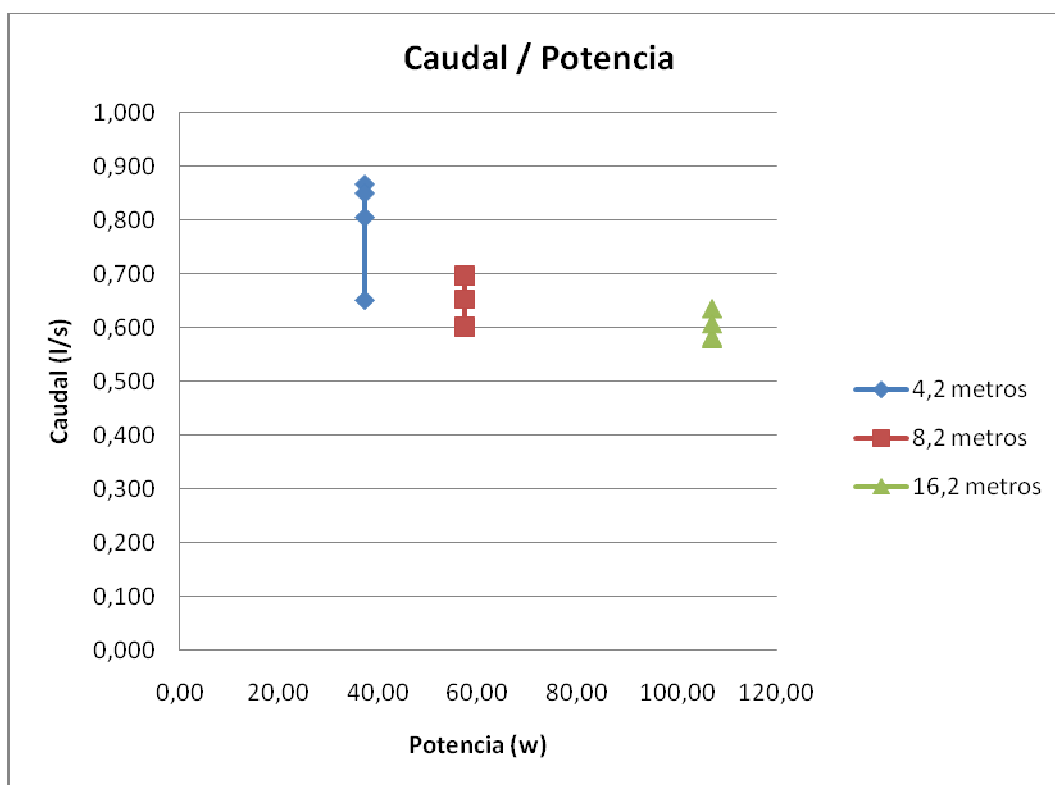
4.13.2.- Caudal frente a Potencia.

Primero vamos a definir, teniendo en cuenta los cálculos que relacionan todas las fuerzas que actúan en los dos ejes de la bomba, el par y la potencia, una gráfica que nos sirve para calibrar la frenada del disco a la altura deseada y así poder simular cada situación deseada.



Gráfica 4.8. Gráfica Altura / Lectura de masa del dinamómetro instalado.

Una vez calibrado el dinamómetro a las alturas elegidas, podemos comparar como le afecta al caudal la potencia ejercida. Se ha tomado la medida real de la instalación de 4,2 metros y se ha comparado con dos nuevas medidas figuradas de 8,2 y 16,2 metros.



Gráfica 4.9. Caudal frente a Potencia a diferentes alturas.

Como podemos observar, el caudal disminuye cuando aumentamos la profundidad del pozo. Estos datos se han obtenido considerando que la fuerza de rozamiento es creciente según incrementamos la altura.

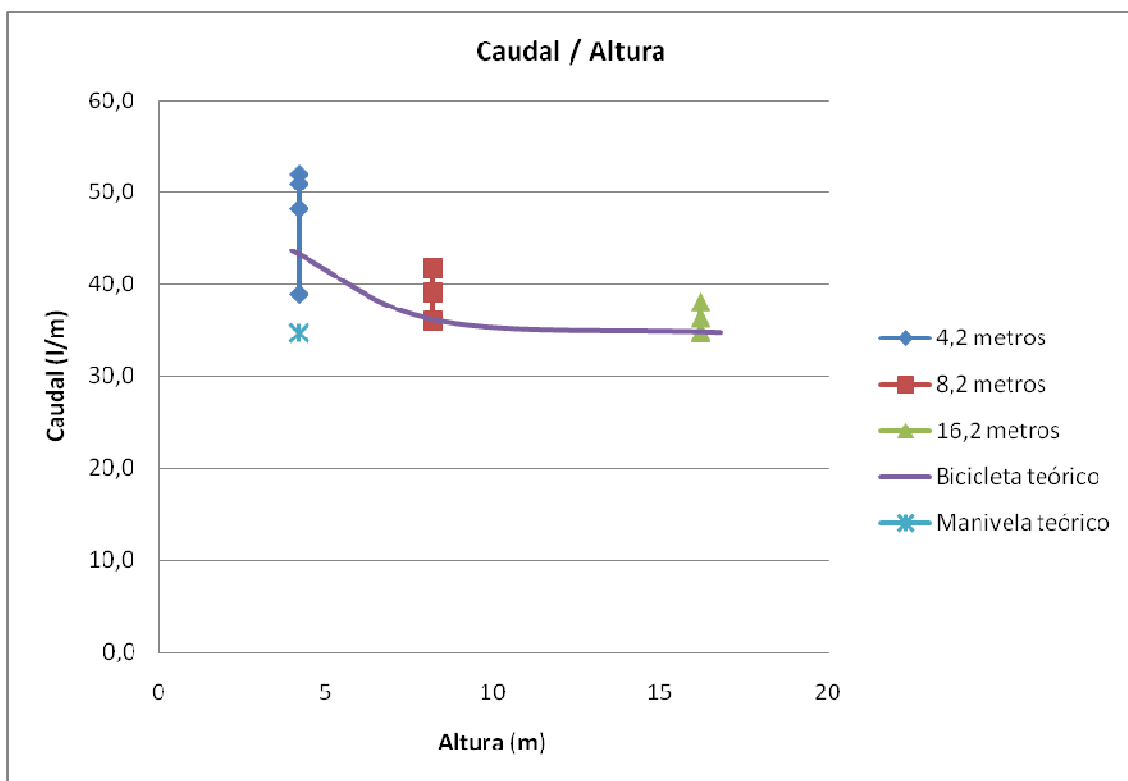
4.13.3.- Caudal frente a Altura.

Si comparamos ahora el caudal obtenido de manera teórica a frecuencia constante (línea violeta de la siguiente gráfica), frente a los datos obtenidos en el laboratorio, podemos obtener una gráfica de caudal frente a altura.

Para los cálculos teóricos hemos tenido en cuenta la expresión del caudal que como vimos en la ecuación [4.7] podíamos expresar de la siguiente manera:

$$Q_{\text{resultante}} = Q_{\text{tubería}} - Q_{\text{pérdidas}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot A \cdot \phi - Q_{\text{pérdidas}}$$

Como se demostró que para una altura útil H_E mayor de 0,53m, tenemos todas las columnas completas de agua, el valor de ϕ va a ser un dato constante. También son constantes los valores de radio de la rueda y área de la tubería. Así observamos que el caudal, para el caso de una instalación fijada, solo depende del valor de la frecuencia de giro y por tanto es independiente de la altura de la instalación.



Gráfica 4.10. Caudal frente a Altura con bicicleta. Comparación de los valores experimentales con los teóricos.

Se ha incluido el valor teórico calculado mediante el accionamiento por medio de la manivela, aunque no existen datos experimentales mediante este accionamiento. Se pueden estimar que estos datos estén por debajo de los datos obtenidos con la bicicleta, puesto que a mayor frecuencia natural, obtenemos mayor caudal.

Se ha representado el caudal en litros por minuto, pues estas unidades son estándares en el campo del estudio de las bombas manuales.

En ella podemos observar que los datos recogidos están dentro de los valores teóricos. Por otro lado, aunque se puso especial cuidado en reproducir las mismas condiciones de frecuencia en los cuatro ensayos realizados a cada intervalo de altura, se puede observar claramente como a medida que aumentamos la altura, la nube de datos está más centrada debido a que es más complicado variar bruscamente la frecuencia aplicada.

Si bien la traza teórica se aproxima bastante al centro de la nube de datos, podemos concluir que existe un error de medida que ha de introducirse en los cálculos para lograr aproximar más la nube de puntos con la tendencia teórica calculada.

5.- CONCLUSIONES

Tras la realización de este proyecto, podemos aportar una serie de conclusiones a la vez que incitar a nuevos estudios relacionados con la Bomba de Mecate.

En primer lugar, se ha conseguido adaptar una bicicleta cualquiera a la bomba de mecate mediante un proceso sencillo, económico y fiable que puede realizar cualquier persona. Se ha justificado el sobrecoste que puede originar la bicicleta sobre la manivela, con una mejora notable en el aumento de potencia sobre la rueda y de frecuencia de bombeo. Por lo tanto a iguales condiciones podemos obtener mayor caudal de agua y con un esfuerzo menor.

Se ha tratado de simular en la medida de lo posible, con la ayuda de un freno y un dinamómetro, los diferentes comportamientos de la bomba ante distintas profundidades de funcionamiento. Aunque no se dispone de algunos aparatos de medida, se ha conseguido caracterizar con bastante exactitud el sistema.

Este proyecto, deja muchas vías abiertas para futuros estudios.

- Si se desea continuar con el mismo modelo de instalación, se pueden adquirir un gran número de datos si se automatiza parte de la instalación, que darán nuevos resultados para resolver nuevas cuestiones.
- Si se desea modificar el modelo de la bici-bomba, se puede construir el diseño de doble altura, con una pequeña polea superior, doblando de esta manera la altura inicial, y obteniendo datos reales comparables con los inscritos en este proyecto.
- Se puede mejorar la robustez de la estructura principal, para ser capaz de simular profundidades mayores, hasta el caso de los 60 metros, que es un valor potencialmente distintivo entre los otros modelos de bombas manuales existentes.
- En el futuro se puede jugar con las múltiples posibilidades de modelización de la bomba, así como de sus componentes, por ejemplo, los pistones, donde dentro del mundo de la termodinámica, se puede estudiar su comportamiento fluido. Con la ayuda de software especializado o de un banco de ensayo, se pueden analizar distintos tipos de pistones.

6.- NOMENCLATURA

A continuación se detalla el extenso listado de nomenclatura usado en este proyecto:

- A: el área de la tubería (m^2).
- D: es el diámetro de la tubería (m).
- d_1 : el diámetro del piñón del eje principal (m).
- d_2 : el diámetro del plato de la bicicleta (m).
- F: frecuencia (Hz).
- $F_{\text{cuerda-rueda}}$: fuerza de rozamiento entre la cuerda y la rueda (N).
- $F_{\text{pistones-tubería}}$: fuerza de rozamiento entre los pistones y la tubería (N).
- $F_{\text{cuerda-botella}}$: fuerza de rozamiento entre la cuerda y la botella (N).
- F_{plato} : fuerza que se ejerce sobre el plato de la bicicleta (N).
- F_{pedales} : fuerza que se ejerce sobre los pedales (N).
- g: la gravedad (9,82m/s).
- h: altura de la instalación (m).
- H_{FA} : altura del frente de agua (m).
- H_E : altura de agua útil en el depósito (m).
- h_{ec} : altura del encañonamiento (m).
- h_{cb} : altura en la contracción brusca (m).
- h_{ec} : altura en la expansión brusca (m).
- h_{cbc} : altura en la contracción brusca en el caudalímetro (m).
- h_{ebc} : altura en la expansión brusca en el caudalímetro (m).
- h_{codos} : altura en los codos (m).
- H_p : altura entre pistones (m).
- k_{cb} : factor k en una contracción brusca.
- K_{ec} : factor k en una expansión brusca.
- K_{cbc} : factor k en una contracción brusca en el caudalímetro.

- K_{ebc} : factor k en una expansión brusca en el caudalímetro.
- m_{cs} : masa de la cuerda que sube (kg).
- m_{cb} : masa de la cuerda que baja (kg).
- m_{ps} : masa de los pistones que suben (kg).
- m_{pb} : masa de los pistones que bajan (kg).
- \dot{m}_e : masa de entrada (kg/s).
- \dot{m}_s : masa de salida (kg/s).
- $M_{bicicleta}$: par en el eje de la bicicleta (N*m)
- N_{c-r} : fuerza normal entre la cuerda y la rueda.
- N_{p-t} : fuerza normal entre el pistón y la tubería.
- N_{c-b} : fuerza normal entre la cuerda y la botella.
- n_1 : el número de revoluciones por minuto del eje principal (rpm).
- n_2 : el número de revoluciones por minuto del eje de pedalier (rpm).
- P_{agua} : peso de la columna de agua (Kkg).
- P_{cuerda} : peso de la cuerda (kg).
- $P_{pistones}$: peso de los pistones (kg).
- P_{bomba} : potencia de la bomba (W).
- Q : el caudal (m^3/s).
- Q_e : caudal de entrada (m^3/s).
- Q_s : caudal de salida (m^3/s).
- R_{biela} : radio de la biela de la bicicleta (m).
- R_{plato} : radio del plato de la bicicleta (m).
- R_e : número de Reynolds.
- S : es la sección de la tubería (m^2).
- ρ : la densidad del agua (kg/m^3).
- η_{bomba} : el rendimiento de la instalación.

- η_v : rendimiento volumétrico.
- η_w : rendimiento de potencia.
- T_{persona} : el tiempo empleado en la extracción de agua (s).
- $V_{\text{agua necesaria}}$: cantidad de agua necesaria para ese momento (litros).
- V : velocidad del fluido (m/s).
- VC : volumen de control.
- W_{persona} : esfuerzo desarrollable por los usuarios (W).
- w_1 : la velocidad de rotación del piñón.
- w_2 : la velocidad de rotación del plato.
- Z_1 : el número de dientes del piñón del eje principal.
- Z_2 : el número de dientes del plato de la bicicleta.
- μ_{c-r} : coeficiente de rozamiento entre la cuerda y la rueda.
- μ_{p-t} : coeficiente de rozamiento entre el pistón y la tubería.
- μ_{c-b} : coeficiente de rozamiento entre la cuerda y la botella.
- Φ : el factor de llenado.
- ε_r : Rugosidad relativa de las paredes de la tubería.
- μ : viscosidad dinámica del fluido (kg/m*s).

7.- BIBLIOGRAFÍA

- BARTLE, Phil. Estudio de la bomba de mecate. Ayuda a las comunidades. Community Empowerment Collective.
- Estudio de las bombas de mecate en Nicaragua. Agencia Suiza para el desarrollo y la cooperación. Water and Sanitation Program. www.wps.org
- ERPF, Karl. RWSN-SKAT. The Rope Pump Concept 2005.
- ERPF, Karl. RANDRIANASOLO, A., *Madagascar Rope Pump Specification*. SKAT, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management, 2004.
- COSUDE. Photographic Presentation of the Rope Pump Production Process. 1997.
- Domestic water quantify, service, level and health 2003. Organización Mundial de la Salud.
- PALLÁS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Editorial Marcombo. 1998.
- PNUD. Informe sobre Desarrollo Humano 2006. Plan de Naciones Unidas.
- N.NORTON, Harry. Sensores y analizadores. Editorial Gustavo Gili S.A. 1984
- MANCEBO Piqueras, J.A. REBASSA TOUS, G. Bomba de Mecate Sobreelevada BM-II. 2010. Universidad de Castilla La Mancha. Universidad Politécnica de Madrid.
- MANCEBO Piqueras, J.A. XVII Curso de cooperación para el desarrollo de Asentamientos Humanos en el Tercer Mundo. Sistemas de impulsión. Febrero 2010.
- MELLEROWICZ, H. Ergometría. Médica Panamericana, Buenos Aires 1984.
- ROPE PUMPS CO. TECHNOLOGY TRANSFER DIVISION *Extra-Strong Rope Pump Manual of Technical Drawings*. (1997).
- Extra-Strong Rope Pump MANUAL OF TECHNICAL DRAWINGS. Rope Pump Co. Managua, Nicaragua 2007.
- TOBELLÁ Arredondo, Javier. Diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate. PFC 2011. Universidad Carlos III de Madrid.
- TOMILLO Gutiérrez, Unai. Estudio acerca del empleo de la bomba manual de agua en el ámbito rural en países en vías de desarrollo. PFC 2005. Universidad Carlos III de Madrid.
- Transferencia de tecnología: Introducción de las Bombas de Mecate (Nicaragua). 2000.

8.- ORGANIZACIONES INTERNACIONALES RELACIONADAS

- APROTEC. Tecnología apropiada. www.aprotec.org
- Bombas de Mecate. www.ropepumps.org
- Organización Panamericana de la Salud. www.col.ops-oms.org
- Cuba solar. www.cubasolar.cu
- ISF Ingeniería sin fronteras. www.isf.es/home/index.php
- Maya pedal. www.mayapedal.org
- The rope pump. www.ropepump.com
- SKAT. www.skat.ch
- Soluciones para el mundo. www.wps.org

9.- ANEXOS

Se adjuntan los planos que se han realizado en el programa SketchUP en formato electrónico. También se ha incluido gran parte de la bibliografía utilizada para la realización de este proyecto.

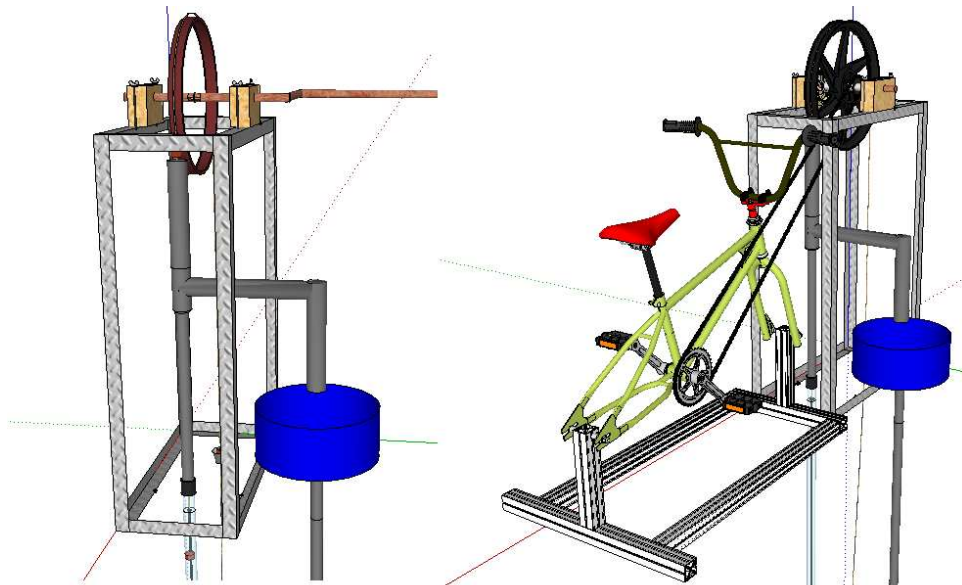


Figura 9.1. Captura de plano de la instalación con manivela. Captura de plano de la instalación con bicicleta.

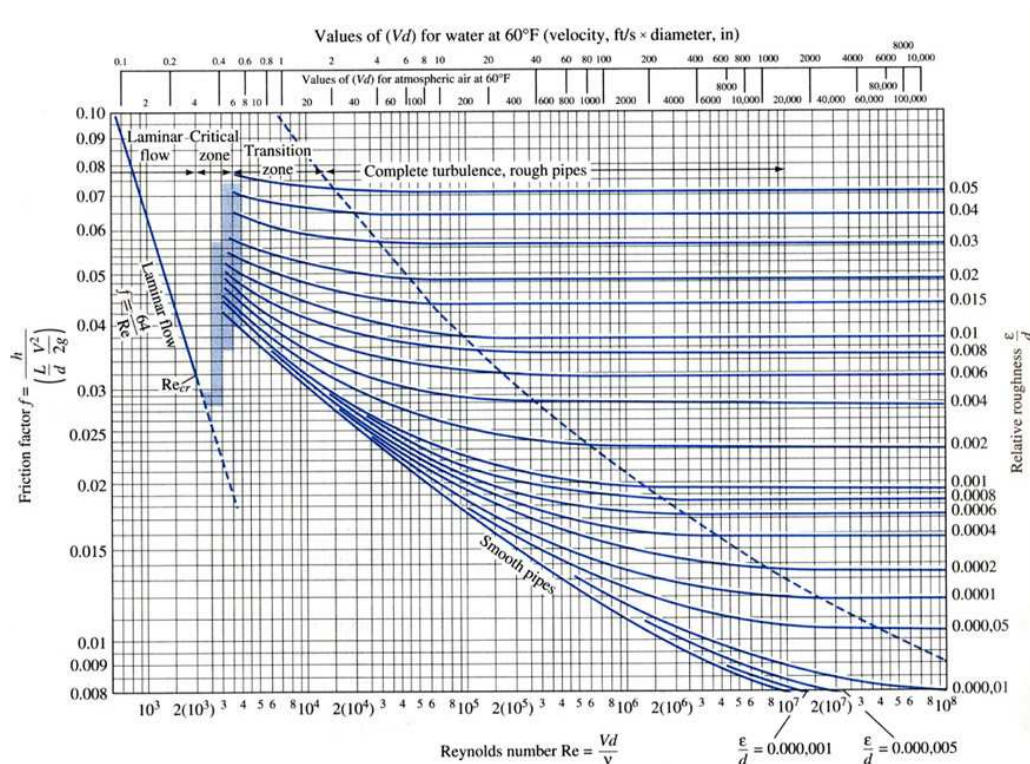


Figura 9.2. Gráfica del Diagrama de Moody.

